



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

SANTTU KUISMA

VAAHTOLASIMURSKEEN HYÖDYNTÄMINEN KEVENNYSRA-
KENTEISSA JA ROUTAERISTEENÄ KAUPUNKIYMPÄRISTÖSSÄ
Diplomityö

Tarkastaja: Professori Pauli Kolisoja
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Tuotantotalouden ja rakentamisen tie-
dekuntaneuvoston kokouksessa
14. elokuuta 2013

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Rakennustekniikan koulutusohjelma

KUISMA SANTTU: Vaahtolasimurskeen hyödyntäminen kevennysrakenteissa ja routaeristeenä kaupunkiympäristössä

Diplomityö, 84 sivua, 6 liitesivua

Lokakuu 2013

Pääaine: Yhdyskuntarakentaminen

Tarkastaja: prof. Pauli Kolisoja

Avainsanat: vaahtolasimurske, routaeriste, kevennysrakenne

Vaahtolasimurske on kevytkiviainesta, jota voidaan käyttää maanrakentamisessa kevennysrakenteissa ja routaeristeenä. Vaahtolasimurskeen käyttö on lisääntynyt Suomessa ja sillä onkin monia käyttömahdollisuuksia infrarakentamisessa. Opinnäytetyössä oli tavoitteena tutkia vaahtolasimurskeen käyttömahdollisuuksia ja verrata sillä tapahtuvan rakentamisen kokonaiskustannuksia tavanomaisiin kiviainesmateriaaleihin.

Opinnäytetyössä mitoitettiin vaahtolasimurskerakenteinen katu ja sille vertailurakenteena tavanomainen katurakenne. Rakenteet mitoitettiin kantavuuden ja routanousun vaatimusten mukaisesti. Tuloksena saatiin kaksi vertailukelpoista katurakennetta ja niiden lisäksi kustannusten vertailuun otettiin mukaan Tampereen kaupungin käyttämä katurakenne. Kustannuslaskennassa huomioon otettiin pois kaivettavien maa-ainesten ja rakentamiseen käytettävien kiviainesten kustannukset. Kustannukset koostuivat sekä materiaalien hinnasta että niiden kuljettamisesta.

Kustannustarkastelujen perusteella Tampereen kaupungin käyttämä rakenne on kaikilla kuljetusetäisyyksillä halvin ratkaisu vertailussa olleista rakennevaihtoehdoista. Vaahtolasimurskerakenne oli taas halvempi ratkaisu kuin vertailurakenne, kun sekä poiskuljetettavien maamassojen että uuteen rakenteeseen käytettävien kiviainesten kuljetusetäisyydet ovat yli viisi kilometriä. Vaikka kuljetusetäisyydet olisivat tätä matkaa lyhyemmät, voi vaahtolasimurskerakenne silti olla kokonaisuudessa edullisempi ratkaisu tietyissä rakentamiskohteissa. Kyseisiä rakentamiskohteita ovat esimerkiksi kadut, joissa esiintyy painumisesta tai routimisesta aiheutuvia haitallisia ongelmia. Rakennuskustannukset ovat vaahtolasimurskerakenteella tällöin suuremmat, mutta rakenteen routiminen ja painumat pienenevät. Mikäli rakennuskohteessa ei erityisesti tarvitse huomioida routimisesta tai painumista aiheutuvia haittoja, niin silloin vaahtolasimurskeella rakentaminen ei anna merkittävän suurta hyötyä tavanomaiseen rakenneratkaisuun verrattuna.

Jatkotutkimuksena tulisi selvittää kahden eri vaahtolasimurskerakenteen toiminta käytännössä. Tutkimuksen tavoitteena olisi selvittää toimiiko vaahtolasimurskekerros riittävän hyvin suoraan pohjamaan päälle rakennettuna routaeristeenä vai tulisiko rakenteeseen lisätä hiekkakerros vaahtolasimurskeen ja pohjamaan välille.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Civil Engineering

KUISMA, SANTTU: Usage of foam glass in frost isolation and light weight structures in urban environment

Master of Science Thesis, 84 pages, 6 Appendix pages

October 2013

Major: Civil Engineering

Examiner: Professor Pauli Kolisoja

Keywords: foam glass, frost insulation, lightweight structure

Foam glass is a lightweight material that can be used in civil engineering. It can be applied as a frost heave insulation or lightweight structure. Usage of foam glass has been lately increased in Finland as there are many possibilities for its application in infra building. The goal of the submitted thesis was the research of possible ways to use foam glass and compare its price to natural stone and sand materials.

The thesis involved design of street structures where foam glass has been used and also comparison of this material with regular stone and sand materials. Structures were designed in a way that they had both good bearing capacity and insulation properties. The two structures provided a good example of comparison of building costs which also involved data used for street structure of City of Tampere. Their calculation took into consideration costs of soil digging and costs of stone and sand materials used for the street structures. The costs included both price of material and transport costs.

According to the research of costs, the street structure of City of Tampere is the cheapest alternative regardless of transport distance. On the other hand, foam glass is generally cheaper than the conventional structure in case the transport distance of both grounds and stone and sand materials is over five kilometers. In case the transport distance is under five kilometers, building costs are higher when foam glass structure is used. However, even if transport distance is shorter than five kilometers, foam glass appears to be the better option. In this case frost heaves and settlement of structure would be lower. For the construction sites which have sufficient bearing capacity and settlement, using of foam glass is not as effective as usage of conventional street structure.

In the future, the research should determine whether the foam glass should be put straight to top of soil or whether it is better to apply a sand layer between them. The research should be aimed mainly at determining which one is better for insulation.

ALKUSANAT

Diplomityö on tehty Tampereen kaupungin tilauksesta. Opinnäytetyöni aikana opin paljon uutta tietoa vaahtolasimurskeesta ja sen käyttömahdollisuuksista.

Haluaisin kiittää ohjaajani Jori Lehtikangasta ja opinnäytetyöni tarkastajaa professori Pauli Kolisojaa saamastani palautteesta ja ohjauksesta.

Tampereella, 18. lokakuuta 2013

Santtu Kuisma

SISÄLLYS

1	Johdanto.....	1
1.1	Tutkimuksen tausta.....	1
1.2	Työn tavoitteet ja rajaukset.....	2
1.3	Tutkimusmenetelmät	2
2	Kevennysmateriaalit tie- ja katurakentamisessa	4
2.1	Vaahtolasimurske	4
2.1.1	Vaahtolasimurskeen ominaisuudet	5
2.1.2	Vaahtolasimurskeen käyttökohteet.....	6
2.2	Vaahtolasimurskeesta rakentaminen	7
2.3	Vaahtolasimurskeeseen liittyvät ympäristönäkökohdat	9
2.4	Muut kevennysmateriaalit.....	11
2.4.1	EPS-solumuovi.....	11
2.4.2	Rengaskevennykset	12
2.4.3	Kevytsora	14
2.4.4	Muita kevennysmateriaaleja.....	16
3	Tie- ja katurakenteen laadunvalvontamittaukset	17
3.1	Troxler-mittaus.....	17
3.2	Levykuormituskoe.....	18
3.3	Pudotuspainolaitemittaus	21
3.3.1	Kevyt pudotuspainolaite	21
3.3.2	Heavy Loadman-pudotuspainolaite	23
4	Tie- ja katurakenteen mitoittaminen	24
4.1	Kuormituskestävyysmitoitus.....	24
4.2	Routamitoitus	26
4.3	Kevennysrakenteiden geotekninen mitoitus.....	30
5	Vaahtolasimurskeen koekohde	35
5.1	Kohteen yleisesittely	35
5.2	Kohteen rakentaminen.....	36
5.3	Rakenteen toteutus ja rakentamiskokemukset	39
5.4	Kantavuusmittausten tulokset	41
6	Tyypipipokileikkaukset ja niiden mitoittaminen	43
6.1	Mitoitusperiaatteet.....	43
6.2	Tyypipipokileikkaus 1, vertailurakenne	43
6.2.1	Kantavuusluokka E.....	43
6.2.2	Kantavuusluokka F.....	46
6.3	Tyypipipokileikkaus 2, vaahtolasimurskerakenne	47
6.3.1	Kantavuusluokka E.....	47
6.3.2	Kantavuusluokka F.....	49
6.4	Tyypipipokileikkaus 3, vaahtolasimurskerakenne hiekkakerroksella	50
6.4.1	Kantavuusluokka E.....	50

6.4.2	Kantavuusluokka F.....	52
6.5	Tampereen kaupungin käyttämä rakenne	53
7	Kustannusten tarkastelu.....	55
7.1	Poikkileikkaukset ja materiaalimenekit pohjamaan kantavuusluokalle E.....	55
7.1.1	Tyypipoikkileikkaus 1, vertailurakenne.....	56
7.1.2	Tyypipoikkileikkaus 2, vaahtolasimurskerakenne	57
7.1.3	Tampereen kaupungin käyttämä rakenne	58
7.2	Kustannusvertailu pohjamaan kantavuusluokalle E.....	59
7.3	Poikkileikkaukset ja materiaalimenekit pohjamaan kantavuusluokalle F.....	69
7.3.1	Tyypipoikkileikkaus 1, vertailurakenne.....	70
7.3.2	Tyypipoikkileikkaus 2, vaahtolasimurskerakenne	71
7.3.3	Tampereen kaupungin käyttämä rakenne	72
7.4	Kustannusvertailu pohjamaan kantavuusluokalle F	73
8	Päätelmät ja jatkotoimenpidesuosituksset.....	79
8.1	Kustannusvertailujen tulokset	79
8.2	Vaahtolasimurskeen käyttömahdollisuudet	80
8.3	Jatkotutkimukset ja yhteenveto vaahtolasimurskeen hyödyntämisestä.....	81
	Lähdeluettelo	82
	Liitteet	

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

Latinalaiset kirjaimet

a	kuormituslevyn säde
a	Odemarkin kaavan vakio
a_i	materiaalin vastaavuus eristävyiden kannalta
a_{rva}	routivan kerrosmateriaalin vastaavuus eristävyiden kannalta
E	kimmomoduuli
E_A	levykuormituskokeen arvo tutkittavan rakennekerroksen alta
E_Y	levykuormituskokeen arvo tutkittavan rakennekerroksen päältä
E_a	mitoitettavan kerroksen päältä saavutettava kantavuus
E_p	mitoitettavan kerroksen alta saavutettava kantavuus
h	rakennekerroksen paksuus
h_{kev}	kevennyskerroksen paksuus maanpinnan ja pohjavedenpinnan välillä
h_{rak}	rakennekerroksen paksuus
h_{tä}	kevennyskerroksen paksuus maanpinnan yläpuolella
h_{Δw}	pohjavedenpinnan alenema
p	kosketuspaine
q_{kaiv.maa}	kevennyksen kohdalta poistetun maan kuorma
q_{rak}	rakennekerrosten kuorma pohjavedenpinnan yläpuolella
q_{kev}	kevennysmateriaalin kuorma pohjavedenpinnan yläpuolella
q_{kev}'	kevennysmateriaalin kuorma pohjavedenpinnan alapuolella
q_w	rakentamisen aiheuttaman pohjaveden alenemisen aiheuttama kuorma
q_x	kuormitukset pohjamaalle
RN_{lask}	laskennallinen routanousu
R_i	routimattoman kerroksen paksuus
R_{rva}	routivan kerroksen paksuus
t_{rva}	routivan kerrosmateriaalin routaturpoama
t	alusrakenteen routaturpoama
r	levyn jäykkyyttä kuvaava kerroin
S	mitoitusroudansyvyys
s	painuma

Kreikkalaiset kirjaimet

ν	Poissonin luku
γ_{rak}	rakennekerroksen ominaispaino
γ_{kev}	kevennyskerroksen ominaispaino
$\gamma_{\text{kev}}^{'}$	pohjavedenpinnan alapuolella olevan kevennyskerroksen ominaispaino
γ_{maa}	pohjavedenpinnan yläpuolella olevan maan ominaispaino
$\gamma_{\text{maa}}^{'}$	pohjavedenpinnan alapuolella olevan maan ominaispaino

Lyhenteet ja nimitykset

EPS	muottipaisutettu polystyreeni (Expanded polystyrene)
Eurokoodi 7	geoteknisen suunnittelun standardit Euroopassa
kantavuus	tie- tai katurakenteen kyky vastustaa muodonmuutosta rakennetta kuormitettaessa
kokonaiskevennys	kevennysrakenne, joka ei aiheuta lisäkuormaa pohjamaalle alkuperäiseen tilanteeseen verrattuna
LVM	Liikenne- ja viestintäministeriö
NCCI 7	Liikenneviraston eurokoodin soveltamisohje geotekniseen suunnitteluun
Odemarkin kaava	rakenteen pinnalta saavutettavan kantavuuden määrittämisessä käytettävä yhtälö
routanousu	maanpinnan pystyliike routimisvaiheessa
vaahdotusagentti	vaahtolasin valmistuksessa käytettävä aine, jonka avulla lasimurske paisuu korkeassa lämpötilassa vaahtolasiksi.
vaahtolasimurske	kierrätyslasia käsitellään teollisessa prosessissa, jonka lopputuotteena saadaan vaahtolasimursketta.

1 JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta

Vaahtolasimurske on uusiomateriaali, jota voidaan käyttää maarakentamiskohteissa esimerkiksi kevennys- ja routaeristemateriaalina. Vaahtolasin valmistaminen keksittiin 1932 Neuvostoliitossa (Stikloporas 2013). Hyvin pian sen jälkeen myös Yhdysvalloissa kehitettiin vaahtolasin valmistusmenetelmä. Vaahtolasin valmistus alkoi Yhdysvalloissa 1940-luvulla ja Euroopassakin jo 1950-luvulla. (Pittsburgh Corning 2013)

Pohjoismaista Norjassa ja Ruotsissa on vaahtolasimursketta käytetty jo vuosia infrarakentamiseen. Norjassa vaahtolasimursketta on käytetty pisimpään pohjoismaista ja siellä onkin vaahtolasimurskeen tuotantoa ollut jo 1990-luvulta alkaen. Suomessa vaahtolasimurske on suhteellisen uusi materiaali ja sen käyttö on ollut vähäistä rakentamisessa. Suomessa ainoa vaahtolasimursketta valmistava yritys on Uusioaines Oy, joka aloitti vaahtolasimurskeen valmistamisen talvella 2011. Tuotteen nimi on Foamit®, joka on rekisteröity tuotenimi. Vaahtolasimursketta valmistetaan Forssassa sijaitsevassa tehtaassa, jossa sijaitsee myös puhdistuslaitos. Puhdistuslaitos puhdistaa lasinsirut jatkojalostajien käytettäväksi. Jatkojalostajiin kuuluvat uusien pakkauslasien valmistajat, lasivillatehtaat ja Uusioaines Oy:n vaahtolasitehdas. (Forsman et al. 2012)

Vaahtolasimurskeella on ominaisuuksia, joiden ansiosta sitä voitaisiin käyttää tulevaisuudessa nykyistä enemmän infrarakentamisessa. Vaahtolasista valmistetun murskeen leikkauskestävyyskulma eli kitkakulma on hyvä, jolloin vaahtolasimurskeen työstettävyys paranee. Materiaali pysyy silloin hyvin kasassa ja työmaalla penger voidaan rakentaa nopeammin, koska materiaalin levittäminen ja tiivistäminen ovat helpompaa. Näiden ominaisuuksien ansiosta vaahtolasimurskeesta rakennettaessa voidaan kerralla tehdä paksumpia kerroksia kuin tavanomaisilla kiviaineiksilla rakennettaessa. Vaahtolasimurskeella on myös hyvä lämmöneristävyys ja se on myös routimaton materiaali, joten se sopii hyvin routaeristeeksi. Koska vaahtolasimurskeella on hyvä lämmöneristävyys, voidaan rakennepaksumuksista tehdä tavanomaista ohuempia. (Forsman et al. 2012)

Vaahtolasimurskeella ei kuitenkaan ole yhtä hyvää mekaanista lujuutta kuin tavanomaisilla kiviaineiksilla. Vaahtolasimurskeen kantavuusominaisuudet ovat heikompia kuin soralla ja murskeella eikä vaahtolasimurskeesta rakennettaessa ole myöskään tarkkaa tietoa sen pitkäaikaiskestävyydestä. (Forsman et al. 2012)

Pehmeikköalueille rakennettaessa voi tie- tai katurakenteen pitkäaikaistoimivuudelle aiheutua ongelmia, kun maarakenteet aiheuttavat liian suuria kuormia olosuhteisiin nähden. Näitä ongelmia ovat suuret painumat, alhainen penkereen vakavuus tai alueellinen heikko vakavuus. Maarakenteiden aiheuttama maanpaine voi aiheuttaa lisäksi poh-

jamaan liikkeitä ja kohdistaa liian suuria kuormia muihin rakenteisiin. Kevennysrakenteita tullaankin rakentamaan lisääntyvässä määrin, koska rakentamista joudutaan tekemään myös huonosti kantaville pohjamaille.

Kuitenkin vaahtolasimurske kiviaineksen korvaajana voisi olla mahdollista jatkossa, koska tulevaisuudessa kiviaineksia joudutaan kuljettamaan kauempaa. Vaahtolasimurskeen hyöty tulee kuljetuksen helppoudesta, koska se on kevyttä ja sen takia sitä voidaan kuljettaa kerralla suurempia määriä. Tällä tavalla voitaisiin säästää kiviainesten kuljetuksissa ja pienentää ympäristöpäästöjä.

1.2 Työn tavoitteet ja rajaukset

Työn tavoitteena on tutkia vaahtolasimurskeen mitoittamista kevennys- ja routaeristyskäytössä ja vertailla sen ominaisuuksia sekä rakentamisen kokonaiskustannuksia muihin pengermateriaaleihin. Muita pengermateriaaleja ovat tässä tapauksessa sellaiset materiaalit, joita käytetään samanlaisissa rakenneratkaisuissa. Tavoitteena on vertailla vaahtolasimurskeen kilpailukyvyistä muihin materiaaleihin verrattuna ja mitoittamisen tuloksena saadaan katurakentamiseen parhaiten sopiva vaahtolasimurskerakenne.

Vaahtolasimurskeen kilpailukykyä voidaan arvioida vertailutaulukolla, jossa on vaahtolasimurskeen ja muiden materiaalien menekkitiedot, kuljetusten kustannukset ja työmaalla käytettävä aika rakenteen tekemiseksi. Lisäksi tarkoitus on vertailla laadunvarmistusmenetelmiä in-situ mittauksilla. Vertailu tehdään materiaalien käytöstä routasuojuuksena ja kevennyspenkereessä.

Mitoitustarkastelun osalta tavoitteena on löytää mahdollisimman hyvä kadun tyyppipoikkileikkaus, joka olisi myös kilpailukykyinen jo olemassa oleviin tyyppipoikkileikkauksiin verrattuna.

Lisäksi työssä tulee olemaan raportointi vaahtolasimurskeella rakentamista Tampereen Vuoreksessa. Rakennuskohteesta selvitetään kuinka vaahtolasimurske käytännössä toimii ja kuinka se eroaa tavanomaisista kiviaineksista ominaisuuksiltaan. Vaahtolasimurskeen käyttökohteista keskitytään vain penger- ja kevennysrakenteisiin. Muut rakentamiskohteet eivät kuulu työn sisältöön.

1.3 Tutkimusmenetelmät

Tutkimusmenetelminä ovat työmaakäynnit ja haastattelut. Haastateltavina ovat Foamit vaahtolasimurskeen myyntipäällikkö Jarmo Pekkala ja lisäksi vaahtolasimurskekohteiden rakentamisessa olleet henkilöt. Vaahtolasimurskeen ominaisuuksista saadaan parhaiten tietoa kirjallisuuslähteistä ja sen hinnasta taas Pekkalan haastattelun yhteydessä.

Rakentamiseen liittyvissä haastatteluissa selvitetään materiaalin ominaisuuksia työmaalla. Tutkittavina asioina ovat materiaalin koossapysyminen, työstettävyyden (levittäminen ja tiivistäminen) ja laadunvarmistusmenetelmät (in-situ mittaukset).

Vertailutaulukossa esitetään katupoikkileikkauksen materiaalimenekit sekä tavanomaisesta katurakenteesta että vaahtolasimursketta käyttäen rakennetusta katuraken-

teesta. Tavoitteena on selvittää kuinka paljon eroa on materiaalimenekeissä ja hinnassa erilaisissa ratkaisuissa.

2 KEVENNYSMATERIAALIT TIE- JA KATURA-KENTAMISESSA

2.1 Vaahtolasimurske

Vaahtolasimurske on uusiomateriaali, jota voidaan käyttää maarakentamiskohteissa esimerkiksi kevennys- ja routaeristemateriaalina. Materiaali soveltuu sekä uudis- että korjausrakentamiseen. Vaahtolasimurske on ollut käytössä muissa pohjoismaissa jo pidemmän aikaa ja esimerkiksi Norjassa sen tuotantoa on ollut 1990-luvulta alkaen. (Forsman et al. 2012)

Suomessa vaahtolasimurske on suhteellisen uusi materiaali ja sen käyttö on ollut vähäistä rakentamisessa. Suomessa ainoa vaahtolasimursketta valmistava yritys on Uusioaines Oy, joka aloitti vaahtolasimurskeen valmistamisen talvella 2011. Materiaalin nimi on Foamit®, joka on rekisteröity tuotenimi. (Pekkala 2013)

Forssassa sijaitsevan tehtaan tuotantokapasiteetti on tällä hetkellä 150 000 m³/vuosi. Osa vaahtolasimurskeesta menee vientiin muihin pohjoismaihin, mutta suurin osa materiaalista käytetään Suomessa rakentamiskohteissa. (Pekkala 2013)

Foamit-vaahtolasimurske valmistetaan kierrätyslasista, jotka on puhdistettu teollisessa prosessissa. Kierrätyslasi jauhetaan alle 0,1 mm lasijauheeksi ja siihen sekoitetaan vaahdotusagenttia. Tämän jälkeen lasijauhe kulkee hitaasti uunin läpi. Uunin lämpötila on 900 °C ja lasimassa paisuu samalla uunin läpi mennessään. Vaahtolasilaatta pirstoutuu jäähtyessään palasiksi ja sen jälkeen se kulkee murskaimien läpi varastokasoihin. (Pekkala 2013)



Kuva 2.1. Vaahtolasilaatta pirstoutuu jäähtyessään.

2.1.1 Vaahtolasimurskeen ominaisuudet

Infrarakentamisessa käytettävä vaahtolasimurske on raekooltaan 10...60 mm (Pekkala 2013). Vaahtolasimurskeen muut ominaisuudet on esitetty taulukossa 2.1

Taulukko 2.1. Vaahtolasimurskeen ominaisuudet (Forsman et al. 2012).

Ominaisuus	Ominaisarvo
Tiheys (irtokuiva)	210 ± 15 % kg/m ³
Tiheys (kuiva, tiivistetty, riippuu tavoitettiiviydestä)	225...290 kg/m ³
Tiheys (kosteaa, pitkäaikaisesti tierakenteessa)	350 kg/m ³
Tilavuuspaino (nostemitoitus)	3,5 kN/ m ³
Kitkakulma (leikkauskestävyyskulma)	36...45°
Tiivistymiskerroin	1,15...1,25
Puristuslujuus (10 % kokoonpuristuma)	0,3...0,4 MPa
Puristuslujuus (20 % kokoonpuristuma)	> 0,9 MPa
E-moduuli (ohut ... paksu päällysrakenne)	55...70 MPa
Lämmönjohtavuus (kuiva)	0,11 W/mK
Lämmönjohtavuus (kosteaa)	0,15 W/mK
Vastaavuus eristävyyden kannalta (verrattuna hiekkaan)	$\alpha_i=4$
Kapillaarinen nousu	200 mm

Tarkempaa tietoa vaahtolasimurskeesta löytyy Emilia Köylijärven (2014) opinnäytetyöstä, jossa on monipuolisemmin käyty läpi materiaalin ominaisuuksia.

Kuivan vaahtolasimurskeen tilavuuspaino on vain seitsemännesosa soran ja murskeen tilavuuspainosta. Vaahtolasimursketta voidaan tämän vuoksi käyttää kevennysrakenteissa, joissa korvataan painavampi kiviaines kevyemmällä materiaalilla. Vaahtolasimurskeen tilavuuspaino riippuu kuitenkin materiaaliin sitoutuneen veden määrästä. Koska vaahtolasimurske on huokoinen materiaali (sisältää n. 92 % ilmahuokosia), se sitoo itseensä vettä ajan kuluessa. Mikäli vaahtolasimurskerakenteeseen pääsee vettä pitkäaikaisesti, kasvaa myös vaahtolasimurskeen tilavuuspaino. Kuitenkin vaahtolasimurskeen tilavuuspaino myös pitkäaikaisesti vedellä kyllästettynä on hyvin pieni verrattuna normaaliin kiviaineksen tilavuuspainoon. (Forsman et al. 2012)

Vaahtolasimurskeen puristuslujuus on heikompi kuin soralla ja murskeella, joten suurten kuormitusten alla on parempi käyttää tavanomaisia kiviainesmateriaaleja kuin vaahtolasimursketta. Vaahtolasimurskeen kantavuutta voidaan parantaa tekemällä paksumpi päällysrakenne, jolloin mitoituksen kannalta voidaan käyttää isompaa E-moduulin arvoa vaahtolasimurskeelle. (Forsman et al. 2012)

Vaahtolasimurskeen leikkauskestävyyskulma on maksimissaan 45 °. Tämä on hyödyllistä penkererakenteissa, jos penger rakennetaan ilman reunoissa olevia tukipenkereitä. (Forsman et al. 2012)



Kuva 2.2. Vaahtolasimursketta varastokasassa.

2.1.2 Vaahtolasimurskeen käyttökohteet

Vaahtolasimursketta voidaan käyttää laajalti rakennusosalalla, mutta ensisijaisesti sitä käytetään täytemateriaalina, routaeristeenä tai salaoitusmateriaalina. Vaahtolasimursketta voidaan käyttää kevennysmateriaalina penkereissä, joissa halutaan pienentää painumia tai parantaa rakenteen vakavuutta. Myös siltojen tulopenkereissä vaahtolasimurskeen käyttö on mahdollista siirtymärakenteena, jolla tasataan painumaeroja. Käyttökohteeksi sopivat lisäksi tukimuurien taustatäytöt, jolloin taustatäytön vaakasuora maanpaine on noin 15...40 % luonnon maa- ja kiviaineksista tehdyn täytön maanpaineesta. (Eriksson 2008)

Suomessa vaahtolasimurskeen käyttökohteita on ollut muutamia, joista suurin on ollut Hämeenlinnan moottoritien kattamisen yhteydessä rakennetut ajoluiskat. Hämeenlinnassa vaahtolasimursketta käytettiin yhteensä 10 000 m³. Vaasan Vaskiluodon tukimuurin taustatäyttö tehtiin vaahtolasimursketta käyttäen ja lisäksi vaahtolasimursketta on käytetty esimerkiksi Isokyrössä alikulkusillan kevennysratkaisussa ja Haminassa ohitustien maapohjan keventämisessä. (Foamit-lehti 2013)

Vaasassa vaahtolasimursketta käytettiin Kalastajankadun alikulkusillan kevennysratkaisussa, koska sillan penkereen stabilointi oli epäonnistunut ja se aiheutti painumaongelmia. Tämä ongelma korjattiin käyttämällä vaahtolasimursketta kevennysmateriaalina, joka vähensi kuormitusta pohjamaalle ja pienensi painumia. Vanha pengermateriaali kaivettiin pois ja se korvattiin vaahtolasimurskeella. Sen jälkeen valettiin siirty-

mälaatta ja tehtiin rakennekerrokset sen päälle. Kohteessa ei ole havaittu tämän jälkeen haitallisia painumia, joten vaahtolasimurskerakenne on toiminut niin kuin se oli suunniteltu. Kuvassa 2.3 on vaahtolasimurskeella rakentamista Vaasan Kalastajankadun kohteesta. (Ingo 2013)



Kuva 2.3. *Kalastajankadun sillan penkereen rakentamista vaahtolasimurskeesta* (Ingo 2013).

Tampereen kaupungin rakennuskohteissa kevennysratkaisuissa ei ole ollut tiettyä materiaalia, mitä olisi käytetty suurimmassa osassa kohteita. Vaahtolasimurske voisikin olla vaihtoehto monipuoliseksi kevennysratkaisuksi, jos sitä olisi koko ajan saatavilla kaupungin välivarastoissa. (Kielo 2013)

Koska vaahtolasimurskeella on hyvä lämmöneristävyys, sitä voidaan käyttää myös routaeristeenä tie-, katu- ja piharakenteissa. Kangasalla Lehtikuusentiellä toteutettiin Suomessa pilottihanke, jossa vaahtolasimursketta käytettiin kadun rakentamiseen. Kangasalan kohteessa tavoitteena oli vähentää kadulla tapahtuneita routavaurioita. Kyseisestä rakennuskohteesta on liitteessä 2 lisää tietoa kadun rakenteesta ja siellä toteutetuista lämpötilan seurantamittauksen tuloksista. (Ronkainen 2013)

2.2 Vaahtolasimurskeesta rakentaminen

Vaahtolasimurskeella rakentaminen ei eroa paljoa tavallisista kiviaineksista rakentamisesta. Sen levittäminen voidaan tehdä kaivinkoneilla tai puskutraktorilla. Rakentaessa tulee muistaa, että vaahtolasimurske murskautuu helpommin ja sitä käsitellessä tulisi

välttää liikaa murskaamasta materiaalia. Materiaali ei saa sisältää lunta eikä jääkokkeita kuten ei saisi tavallinen kiviaineskaan ja talvella materiaali tulisi suojata, jotta sekaan ei pääsisi jäätä eikä lunta. Lisäksi vaahtolasimurskeesta on ruotsalaisessa ohjeessa sanottu, että vaahtolasimurskeen lämpötilan tulee olla yli 0 °C sillä rakennettaessa. (Eriksson 2008)

Vaahtolasimurskeen suurin kerrospaksuus kerralla rakennettaessa ja tiivistäessä tulee olla enintään 0,8 m ja luiskakaltevuus 1:1. Vaahtolasimurskekerroksen päältä ei saa mennä koneilla, joiden aiheuttama pintapaine on yli 50 kPa. Vaahtolasimurskekerrokselle tehdään esitiivistys joko tela-alustaisella työkonella tai tärylevyllä. Esitiivistys tulee tehdä huolellisesti vaahtolasimurskekerroksen päältä, jotta kerrospaksuudesta ja kerroksen pinnasta tulee tasainen. Esitiivistys on riittävää, kun teloista ei jää painumajälkiä vaahtolasimurskekerroksen pintaan ja lisäksi pinta on tasainen. Rakeet rikkoutuvat kerroksen pinnassa esitiivistyksen aikana, mutta siitä ei ole haittaa koko rakenteelle. Heikosti kantaville pohjamailla rakennettaessa on ennen esitiivistystä varmistettava, että alimman tiivistyskerroksen paksuus on riittävä, jotta pohjamaa ei häiriintyisi tiivistyksen seurauksena. Vaahtolasimurskeen kokoonpuristuma tulee myös ottaa huomioon tiivistystyössä. Ennakkokorotus tulisi olla rakenteesta ja tavoitetiiviydestä riippuen 10...25 % tiivistämättömän vaahtolasimurskekerroksen paksuudesta. (Forsman et al. 2012)

Varsinainen tiivistys tehdään noin 150...200 mm (#0/32 tai #0/63 mm) paksuisen murskekerroksen päältä. Tiivistyskalustona käytetään täryjyrää (1- tai 2-valssinen) ja kaluston sekä yliajokertojen valinnassa on otettava huomioon vaahtolasimurskekerroksen paksuus ja pohjamaan kantavuus. Tiivistäminen suoraan vaahtolasimurskekerroksen päältä käyttäen täryvalssijyrää ei ole kokemusten perusteella suositeltavaa, koska materiaali lähtee rullautumaan koneen mukana ja sen seurauksena materiaali ei tiivisty riittävästi. Taulukossa 2.2 on esitetty tarvittavat esitiivistyksen tiivistysmäärät. (Forsman et al. 2012)

Taulukko 2.2. Esitiivistyksen kalusto ja vaatimukset tiivistystyölle (Eriksson 2008).

Kalusto	Maksimikerrospaksuus	Yliajokerrat
Tela-alustainen työkon ≤ 50 kPa	0,8 m	2
Tärylevy (50...200kg)	0,5 m	2

Vaahtolasimurskerakenteen kunnossapito ei edellytä ylimääräisiä toimenpiteitä ja tien rakenteen kunnossapito vähenee routanousujen ja painumien vähenemisen myötä. Norjassa vaahtolasimursketta on käytetty vuodesta 1999 asti, eikä siellä ole jouduttu tekemään ylimääräisiä huoltotoimenpiteitä kohteissa, joissa vaahtolasimursketta on käytetty. (Eriksson 2008)

2.3 Vaahtolasimurskeeseen liittyvät ympäristönäkökohdat

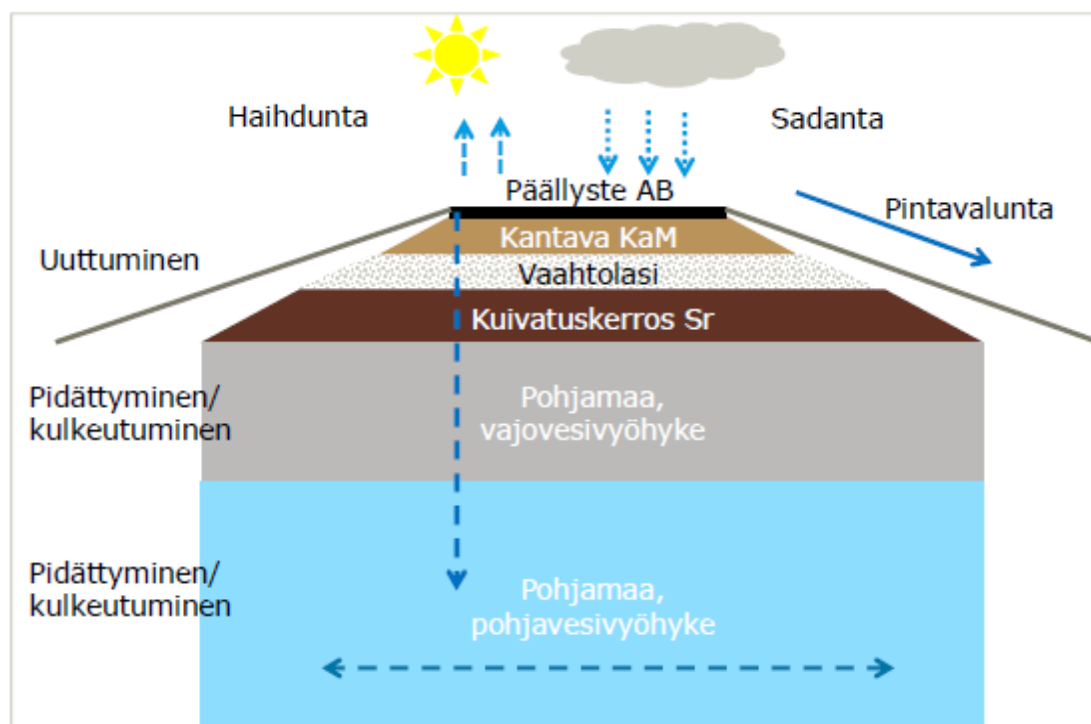
Vaahtolasimurske koostuu lasista (8 %) ja ilmasta (92 %). Materiaalin uudelleenkäyttö on mahdollista samankaltaisissa rakennuskohteissa tai materiaali voidaan varastoida myöhempää käyttöä varten. Koska materiaalissa on ainoastaan ilmaa ja lasia voidaan se viedä kaatopaikalle, mikäli sille ei löydy uutta käyttökohdetta. (Eriksson 2008)

Vaahtolasimurske on palamatonta keraamista materiaalia ja se kestää tavallisia kemiallisia aineita. Kemiallisia aineita tie- ja katuymäristössä ovat esimerkiksi öljyt ja tiesuola. Vaahtolasimurskeen pH-luku on noin 10 eli se on emäksistä. (Lindroos 2013)

Vaahtolasimurskeen käytöstä pohjavesialueella on tehty riskienarviointi, jossa on tutkittu sen käyttöä tierakenteessa pohjaveden muodostumisalueella. Tutkimuksessa on todettu, että vaahtolasimurskeesta liukenevia kriittisiä materiaaleja ovat arseeni ja antimoni. Kyseisten haitta-aineiden liukeneminen vaahtolasimurskeesta ei kuitenkaan aiheuta pohjaveden pilaantumisriskiä alueilla, joissa pohjamaana on vettä läpäiseviä maa-aineksia esimerkiksi soraa tai hiekkaa. Näillä alueilla pohjavedenvirtaus laimentaa haitta-aineiden pitoisuudet merkityksettömän alhaiselle tasolle. (Lindroos 2013)

Mikäli pohjamaassa on hienoainesta sisältävää materiaalia kuten silttimoreenia, silttiä tai savea, voivat kriittiset haitta-ainepitoisuudet nousta korkeammiksi kuin alkuperäiset haitta-ainepitoisuudet. Tämän kaltaisia alueita ei luokitella kuitenkaan pohjaveden muodostumisalueiksi, koska niillä on huono ominaisantoisuus. Näin ollen voidaan todeta, että merkittävää pohjaveden pilaantumista ei tule tapahtumaan. (Lindroos 2013)

Suomessa tavallista suurempia arseenipitoisuuksia on Pirkanmaalla ja myös Tampereen alueella, koska alueen maa- ja kallioperässä on poikkeuksellisen korkeat arseenipitoisuudet. Tämän takia Tampereen alueella rakennettaessa ei vaahtolasimurskeen aiheuttama arseenin lisäys pohjavedessä tule muuttamaan merkittävästi pohjavedessä olevan arseenin määrää. (Lindroos 2013)



Kuva 2.4. Vaahtolasimurskeen sisältämien haitta-ainesten kulkeutuminen pohjaveteen (Lindroos 2013).

Suomessa ainoa markkinoilla oleva vaahtolasimurske tuote on Foamit, joka on CE-merkitty tuote ja se täyttää standardin SFS-EN13055-2 vaatimukset. Standardin vaatimukset koskevat kevytkiviaineeksiä sidottuihin ja sitomattomiin käyttötarkoituksiin. CE-merkityn Foamit-tuotteen vaatimuksiin kuuluu teknisen testauksen lisäksi sen ominaisuudet puhtauden, terveyden ja ympäristön kannalta. Koska materiaalia käytetään maa- ja vesirakentamisessa, käytetään siihen korkean turvallisuusvaatimuksen osoittamismenettelyä 2+. (Forsman et al. 2013)

Vaatimustenmukaisuuden osoittamismenettelyssä 2+ valmistaja vastaa tuotteen alkutestauksesta ja tuotantolaitoksen sisäisestä laadunvalvonnasta. Tämän lisäksi arviointilaitos (sertifiointilaitos) vastaa tuotantolaitoksen sisäisen laadunvalvonnan alkutarkastuksesta, sen jatkuvasta valvonnasta, arvioinnista ja hyväksymisestä. (Tiehallinto 2003)

Vaahtolasimurskeen emäksisyydestä johtuen sen aiheuttamat haitat teräkselle tulisi selvittää. TTY:llä on tällä hetkellä menossa tutkimus emäksisyyden vaikutuksista teräkselle ja tutkimuksen tulokset vaikuttavat paljon vaahtolasimurskeen käyttökohteisiin. Tarkempaa tietoa tutkimusten tuloksista on mahdollista saada TTY:n ja Uusio-aineksen kautta.

2.4 Muut kevennysmateriaalit

Kevennysrakentamisessa voidaan käyttää monenlaisia materiaaleja, jotka ovat tavanomaisia kiviaineksia kevyempiä. Seuraavat materiaalit ovat vaahtolasimurskeen kaltaisia kevennysmateriaaleja, joista on kokemuksia maailmalla ja myös Suomessa tehdyistä rakennuskohteista. Seuraavat materiaalit käsittävät vain osan mahdollisista materiaaleista, mutta antavat yleiskuvan materiaalien ominaisuuksista ja kevennysmateriaalien mahdollisuuksista.

2.4.1 EPS-solumuovi

EPS-solumuovi on paisutettua polystyreenimuovia. EPS on lyhenne sanoista expanded polystyrene. EPS:llä on hyvä lämmöneristävyys ja se on hyvin kevyttä. Materiaali ei myöskään johda vettä kapillaarisesti eikä se lahoa tai homehdu biologisesti. (EPS-Esite 2013)



Kuva 2.5. EPS rakenteen tekemistä (Cahayna styrofoam, Indonesia 2013).

EPS:ä käytetään routa- ja lämmöneristeenä sekä painuvilla pohjilla rakenteen keventävänä kerroksena. Se on hyvin kevyttä materiaalia ja materiaalin käsittely ei vaadi mitään erityisiä suojavarusteita. EPS:n kemiallinen kestävyys riittää vain tavallisille hapoille ja emäksille. Se ei kestä kuitenkaan bensiinejä, mineraaliöljyjä tai muita hiilivetyliuotteita. Tämän takia EPS-kerros tulee tierakentamisessa suojata esimerkiksi muovikalvolla, että kyseiset materiaalit eivät pääsisi hajottamaan EPS:ä. (Saarelainen 2003)

EPS:n käytöstä tierakentamisessa tulee huomioida liukkaudentorjunta ja sen aiheuttamat vaatimukset rakenteelle. EPS-kerroksen päälle tulee tehdä 500...700 mm paksuinen kerros kiviaineksesta, jotta tiehen ei aiheutuisi ylimääräistä liukkautta EPS:n käytön seurauksena. Tämä johtuu siitä, että EPS toimii lämpöeristeenä ja sen yläpuolella olevien kerrosten lämpökapasiteetti ei sen takia riitä tasoittamaan pintalämpötilojen

vaihtelua. Ongelma esiintyy keväisin ja syksyisin, kun lämpötila vaihtelee voimakkaasti jäätymispisteen molemmin puolin. EPS:n ominaisuudet on esitetty taulukossa 2.3. (Saarelainen 2003)

Taulukko 2.3. EPS:n materiaaliominaisuudet (Saarelainen 2003).

Ominaisuus	Ominaisarvo *
Tilavuuspaino	0,2...0,45 kN/m ³
Tilavuuspaino (stabiliteetti ja painuma)	1,0 kN/m ³
Tilavuuspaino (nostemitoitus)	0,2 kN/m ³
Puristuslujuus (kokoonpuristuma 10 %)	120 / 200 / 300 kPa
E-moduuli	10 / 16 / 24 MPa
lämmönjohtavuus	0,0344 W/m*K

*EPS laadut: EPS 120 / EPS 200 / EPS 300

2.4.2 Rengaskevennykset

Rengasmateriaalin etuina normaaliin tavalliseen kiviainekseen verrattuna on sen keveys, pieni maanpaine, hyvä lämmöneristävyys, suuri vedenjohtavuus ja kyky vähentää tärinää. Sitä voidaan käyttää maanpaineseinän ja tukimuurien taustatäyttöihin kuin myös siltojen tulopenkereiden täyttöihin. Renkaita voidaan käyttää kokonaisina, niitä voidaan sitoa paaleiksi tai leikaita rengasrouheeksi. Renkaat koostuvat pääasiassa kumista, mutta niissä on myös nokea ja terästä. (Humprey 2013)

Rengasrouhe



Kuva 2.6. Rengasrouheen levittämistä (Humprey 2013).

Rengasrouheen pääkäyttökohteisiin kuuluvat alemman luokan tiet, kenttärakenteet ja siirtymärakenteet. Materiaali on edullista verrattuna kiviainekseen ja myös huomattavasti kevyempää. Se vaatii kuitenkin paksut päällysrakenteet, koska rengasrouheen E-moduuli on alhainen. Lisäksi sen käyttö ei ole sallittu pohjavesialueilla (Liikennevirasto 2011). Rengasrouheen ominaisuudet on esitetty taulukossa 2.4.

Taulukko 2.4. Rengasrouheen ominaisuudet (Liikennevirasto 2011).

Ominaisuus	Ominaisarvo
Nimellismitta	50...300 mm
Tilavuuspaino (kuiva)	4 kN/m ³
E-moduuli	3 MPa
Lämmönjohtavuus	0,025 W/m*K

Rengaspaalit



Kuva 2.7. Rengaspaalien käyttämistä Tampereen läntisellä kehätiellä (Suomen Rengaskierrätys 2005).

Rengaspaalit koostuvat kokonaisista renkaista ja ne on sidottu paaleiksi terässiteillä. Yhden rengaspaalin tilavuus on noin 1,4 m³. Kokonaisilla renkailla tarkoitetaan yleensä henkilöauton tai kuorma-auton renkaita. Lisäksi rengaspaaleissa voidaan käyttää esimerkiksi maarakennuskoneiden renkaita. Rengaspaalien käyttökohteita ovat meluvallit,

alempiluokkaisten teiden keventäminen pehmeiköllä ja tulva-alueella sekä pengerrakenteet, joihin ei aiheudu suuria kuormia. Myös rengaspaaleille vaaditaan hankekohtainen ympäristölupa eikä niitä voida käyttää pohjavesialueilla. Rengaspaalien ominaisuudet on esitetty taulukossa 2.5. (Liikennevirasto 2011)

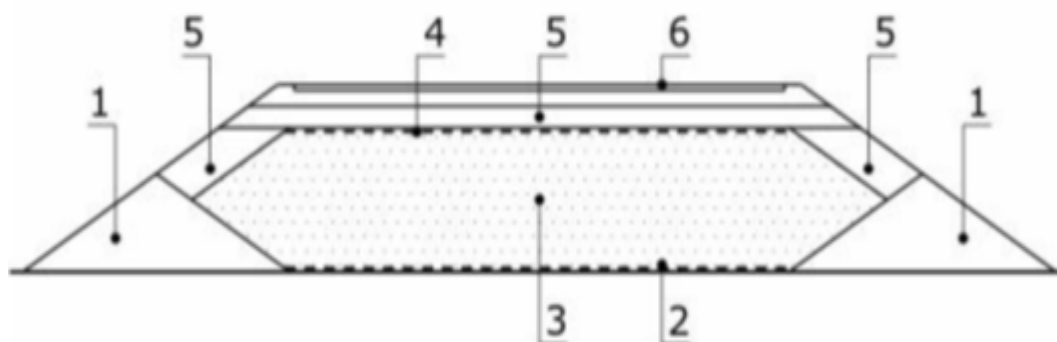
Taulukko 2.5. Rengaspaalien ominaisuudet (Liikennevirasto 2011).

Ominaisuus	Ominaisarvo
Nimellismitta	pituus x leveys x korkeus 1,5 x 1,4 x 0,75 m ³
Tilavuuspaino (kuiva)	5,5 kN/m ³
Vedenläpäisevyys	$1 \cdot 10^{-2} \dots 10^{-1}$ m/s

2.4.3 Kevytsora

Kevytsora valmistetaan kotimaisesta plastisesta savesta. Esimuokkauksen jälkeen savi poltetaan pyöreässä uunissa noin 1150 °C lämpötilassa. Poltossa savi paisuu ja muotoutuu uunin pyörivän liikkeen vaikutuksesta pinnaltaan sintrautuneiksi rakeiksi. Rakeet ovat täynnä pieniä, suljettuja ilmahuokosia, joten kevytsora on kevyttä ja hyvin lämpöä eristävää. Kevytsora on keraaminen palamaton luonnontuote, jonka pehmenemispiste on noin 950 °C ja sulamispiste noin 1150 °C. Kevytsora on kemiallisesti neutraalia, sen pH on noin 7. (KH-kortisto 2013)

Rakennettaessa heikosti kantaville maapohjalle, kevytsoralla estetään haitalliset painumat, maapohjan murtuminen ja parannetaan rakenteen vakautta; rakenteet voidaan tehdä maanvaraisina ilman erillistä pohjanvahvistusta. Kuvassa 2.8 on poikkileikkaus kevytsorapenkereestä. (KH-kortisto 2013)



Kuva 2.8. Kevytsoratäytteisen penkereen poikkileikkaus (Suomen kuntaliitto 2011).

Kevytsoratäytteisen penkereen poikkileikkauksen merkinnät on kerrottu alla.

- 1) Reunapenkereiden ja kuivatuksen rakentaminen
- 2) Suodatinkankaan asentaminen
- 3) Kevytsoratäytön tekeminen
- 4) Yläosan suodatinkankaan asentaminen
- 5) Jakavan kerroksen ja luiskatäytön tekeminen
- 6) Kantavan kerroksen rakentaminen ja tien päällystäminen

Maarakenteiden keventämisessä käytetään kevytsoraa, jonka kuivatilavuuspaino on enintään $3,2 \text{ kN/m}^3$. Lisäkantavuutta saadaan stabiloimalla kevytsorapenger esimerkiksi sementillä tai bitumipohjaisilla aineilla. Taulukossa 2.6 on esitetty kevytsoran ominaisuudet. (KH-kortisto 2013)

Taulukko 2.6. Kevytsoran ominaisuudet (KH-kortisto 2013).

Ominaisuus	Ominaisarvo
Raekoko	4...32 mm
Tilavuuspaino (kuiva)	4 kN/m^3
Tilavuuspaino (ajoittain veden alla)	5 kN/m^3
Tilavuuspaino (pysyvästi veden alla)	10 kN/m^3
Kitkakulma (leikkauskestävyysskulma)	33...37 astetta
E-moduuli	30...80 MPa
Lämmönjohtavuus (kosteuspitoisuus 30 %)	0,017 $\text{W/m}^{\circ}\text{K}$

2.4.4 Muita kevennysmateriaaleja

Pohjatuhka ja lentotuhka ovat kivihiilen, turpeen tai puuperäisen aineksen palamistuotteita. Pohjatuhka otetaan talteen polttokattilan pohjalta ja lentotuhka savukaasuista suodattimen avulla. Molempia voidaan käyttää kevennysrakenteina esimerkiksi teiden, katujen, pyöriteiden ja jalkakäytävien rakenteissa. Pohjatuhkan ja lentotuhkan kevennysvaikutus on melko pieni, mutta ne ovat silti kevyempiä kuin useimmat kiviainekset. (Liikennevirasto 2011)

Terästeollisuuden masuunikuonasta saadaan valmistettua masuunikuonamursketta ja masuunihiekkaa. Masuunikuonamursketta voidaan käyttää päällysrakenteen jakavassa ja kantavassa kerroksessa ja masuunihiekkaa taas soveltuu jakavaan kerrokseen. Molemmilla materiaaleilla on hyvä kantavuus ja kohtuullisen pieni tilavuuspaino. (Liikennevirasto 2011)

Kevennysrakenteissa voidaan materiaaleina käyttää lisäksi muun muassa palaturvetta, vaahtobetonia, kevytbetonisepeliä, tiilimursketta ja puunjalostuksen sivutuotteita. (Liikennevirasto 2011)

3 TIE- JA KATURAKENTEEN LAADUNVALVONTAMITTAUKSET

Tässä luvussa käydään läpi yleisimmät in situ-mittaukset tie- ja katurakenteiden osalta. Rakenteen laadun varmistamiseksi voidaan tehdä työmaalla kokeita, joilla arvioidaan työn tuloksen laatua. Menetelmät ovat yksinkertaisia tehdä, joten niitä voidaan käyttää hyvin työmaaolosuhteissa. Esitellyt koemenetelmät tie- ja katurakenteiden laadunvalvontaan ovat Troxler-mittaus, levykuormituskoe ja pudotuspainolaite.

3.1 Troxler-mittaus

Maanrakennuskohteiden tiiveyden ja vesipitoisuuden mittaukseen voidaan käyttää radioaktiivista lähdettä sisältävää laitetta. Yleisin tällainen laite on Troxler-mittalaite. Laite tuottaa radioaktiivista säteilyä, joka kulkee suoraan laitteen ilmaisimeen tai heijastuu mittavasta maasta ilmaisimeen. Laite on silti turvallinen käyttää, koska se on umpilähde eli radioaktiivinen aine ei pääse leviämään ympäristöön eikä siihen voi koskea. (Kaner-va 1985)



Kuva 3.1. Radiometrisiin mittauksiin käytettävä TROXLER 3440 (Troxler labs, Yhdysvallat 2013).

Troxler-laitetyyppejä ovat pinta-anturi-, lähianturi- ja syvyysanturilaite ja niillä voidaan tehdä suora- ja heijastusmittausta. Pinta-anturit ovat maanpinnalle asetettavia laitteita, jotka käyttävät heijastusmenetelmää maan tiheyden ja vesipitoisuuden mittaamiseen. Pintamittauksessa ei rakennetta tarvitse rikkoa, mutta sen mittaussyvyys on vain

7,5...10 cm. Lähianturimittaus taas perustuu suoramittausmenetelmään ja siinä anturi työnnetään valmiiksi tehtyyn reikään. Mittaussyvyys tässä menetelmässä on maksimissaan noin 20...30 cm. Syvyysmittarilla voidaan mittaus ylettää 5 metristä aina 20 metrin syvyyteen. (Kanerva 1985)

Laitteen käyttö alkaa sen päälle kytkemisellä, minkä jälkeen se asetetaan kalibrointilevylle. Mikäli tehdään suoramittauksia, tulee rakenteeseen tehdä reikä säteilyanturia varten. Reikä tehdään 5 cm syvemmälle kuin haluttu maksimi mittaussyvyys. Tämän jälkeen anturi työnnetään varovasti reikään ilman, että reunat rikkoontuvat. Lopuksi mittaustulokset ovat hetken päästä luettavista koneesta. (Kanerva 1985)

Radiometrisen mittauksen etuna on, että mittaus voidaan toistaa useasti. Mittaus on myös nopeata ja kalusto on pienikokoinen. Rakenteeseen ei tarvitse tehdä kuin reikä, joten rakennetta ei tarvitse rikkoa kokonaan mittausten takia. Huonoja puolia ovat laitteen epätarkkuudet heijastusmittauksessa, koska laite on erityisesti herkkä pinnan epätasaisuuksille. Lisäksi Troxler-mittaus ei sovellu karkearakeisten materiaalien tiiviiden mittaamiseen, jolloin rakenteen tiiviys täytyy selvittää kantavuuskokeilla (Kanerva 1985). Vaahtolasimurskeen tiheyden mittaamiseen Troxler-laitteisto ei ole sopiva mittauspa, koska vaahtolasimurskeen tiheys ei vastaa normaalin kiviaineksen tiheyttä.

3.2 Levykuormituskoe

Levykuormituskoe on Pohjoismaissa yleisesti käytetty koemenetelmä tie- ja maarakenteiden tiiviys- ja muodonmuutosominaisuuksien selvittämiseksi. Menetelmä on käytössä myös mm. Saksassa, Itävallassa, Sveitsissä, Rankassa, Englannissa ja USA:ssa. Levykuormituslaite koostuu kuormituslevystä, joka on yleensä halkaisijaltaan 300 mm ja vastapainosta. Vastapainona voidaan käyttää esimerkiksi kaivinkonetta tai kuorma-autoa. Laitteessa on myös painemittari, tunkki ja mittarilaitteisto. Levykuormituslaitteen periaatteena on mitata rakenteen painuma, joka aiheutuu staattisesta voimasta. (Ehrola 1996).



Kuva 3.2. Levykuormituskokeen laitteisto (Road masters 2013).

Levykuormituskoetta tehdessä tien tai sen jonkin rakennekerroksen päältä siihen vaikuttaa välittömästi alla olevan materiaalin muodonmuutosominaisuudet ja lisäksi sen alapuoleisten rakenteiden ominaisuudet. Näin ollen levykuormituskokeella määritetty muodonmuutosmoduuli ei vastaa yksittäisten materiaalien käyttäytymistä rakenteessa. Tämän takia rakennekerrosten materiaalien ominaisuuksia ei pystytä suoraan määrittämään levykuormituskokeella. Tulokseksi saadaan näennäinen muodonmuutosmoduuli, joka kuvaa vain tien ylimpien kerrosten (0,5m...0,8 m) kokonaiskäyttämistä. (Ehrola 1996)

Kokeessa kuormitus nostetaan 10 kN portain 60 kN maksimikuormaan asti. Kuormitus tehdään kaksivaiheisena ja muodonmuutosmoduulit E_1 ja E_2 saadaan laskettua Boussinesq'n esittämän ympyrämuotoisen kuormitetun levyn keskipisteen painuman laskentamallilla. (Ehrola 1996)

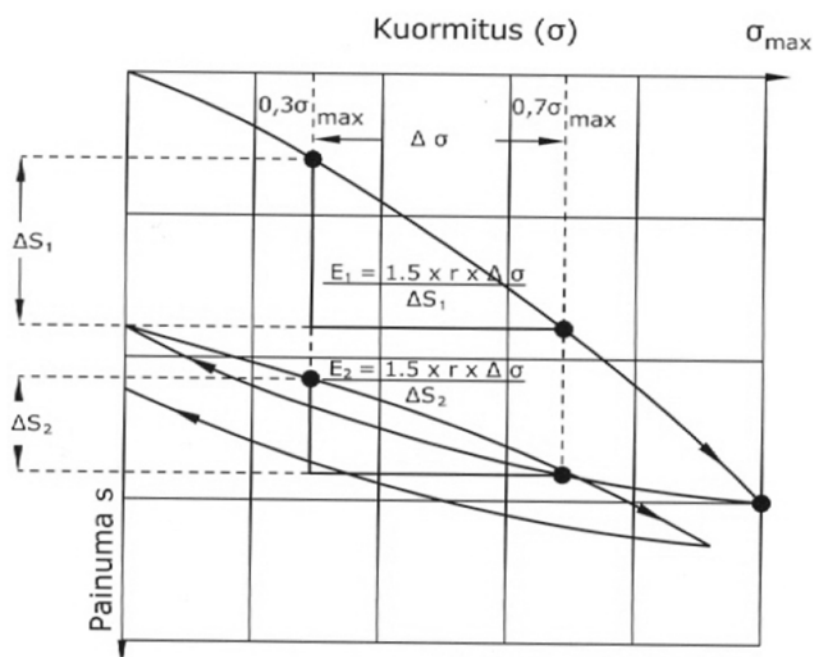
$$E = r(1 - \nu^2) \cdot \frac{p \cdot a}{s} = k \cdot \frac{p \cdot a}{s} \quad (3.1)$$

jossa

E	on kimmomoduli, MPa
r	on kerroin, jonka arvo on $\pi/2$, jos levyn oletetaan olevan jäykkä ja 2, jos levyn oletetaan olevan taipuisa.
ν	on Poissonin luku
p	on kosketuspaine, kN/m ²
a	on kuormituslevyn säde, m
s	on painuma, mm

Kertoimen k-arvo riippuu kuormituslevyn jäykkyydestä ja kuormitetun rakenteen materiaalin Poissonin luvusta. Poissonin luvun arvo tien rakennemateriaaleille on yleensä 0,3...0,5 välillä. Näin ollen kertoimen k-arvot vaihtelevat 1,2...1,8 välillä. Mittauksissa käytetäänkin tämän vaihteluvälin keskiarvoa eli arvoa 1,5. (Ehrola 1996)

InfraRYL 2006 esittää muodonmuutosmoduulin laskettavaksi kuvan 3.2 kuormitus-painumakuvaajan kaavojen mukaan. Muodonmuutosmoduulin laskennassa kaavoissa otetaan huomioon muutos jännitysvälillä 30... 70 %. (InfraRYL 2006)



Kuva 3.3. Muodonmuutosmoduulin määrittäminen levykuormituskokeen kuvaajasta (InfraRYL 2006).

Tien rakennekerrosten materiaalien muodonmuutosmoduulien arvoa voidaan myös arvioida levykuormituslaitteella. Kun mittaukset tehdään sekä rakenteen päältä että alapuolelta, pystytään mittaustuloksista laskemaan muodonmuutosmoduuli Odemarkin kimmoteorian yhtälön perusteella. Yhtälössä rakennekerroksen muodonmuutosmoduuli on funktio levykuormituskokeen antamista moduuliarvoista ja mitatun rakennekerroksen paksuudesta. (Ehrola 1996)

$$E = f (E_A, E_Y, h) \quad (3.2)$$

jossa

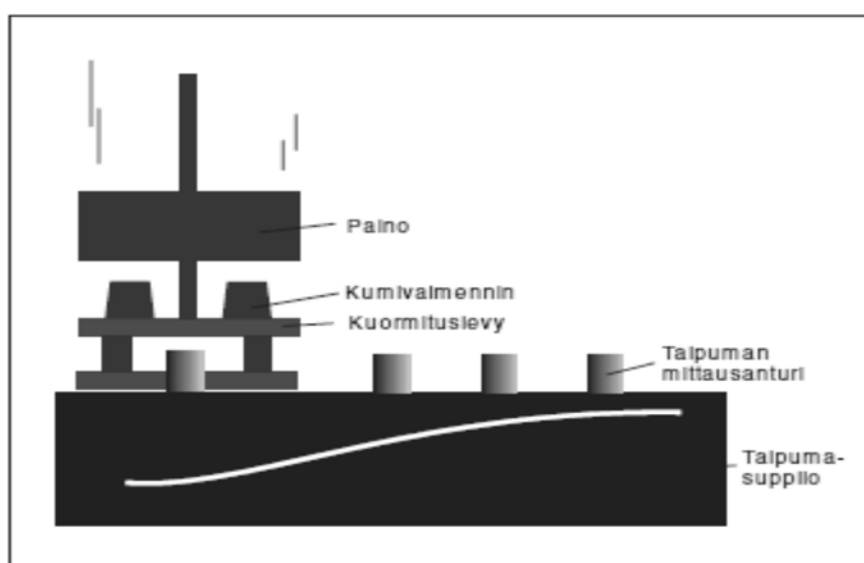
- E_A on levykuormituskokeen arvo tutkittavan rakennekerroksen alta
- E_Y on levykuormituskokeen arvo tutkittavan rakennekerroksen päältä
- h on tutkittavan rakennekerroksen paksuus

Kaavaa 3.2 hyödynnetään myöhemmin esitettävässä Odemarkin laskentamenettelyssä, jolla voidaan laskea tie- ja katurakenteen eri kerrosten kantavuusarvot.

Levykuormituskokeen heikkona puolena voidaan pitää sen staattista luonnetta, koska kyseinen kuormitus ei vastaa hyvin liikenteen aiheuttamaa kuormitusta. Lisäksi painumassa on aina mukana jonkin verran pysyviä muodonmuutoksia vaikka kuormitus toistetaan kaksi kertaa. Tämän takia tuloksista voi tulla todellista pienempiä arvoja. Koe-menettelyn heikkoutena on myös mittaustapahtuman hitaus. (Ehrola 1996)

3.3 Pudotuspainolaitemittaus

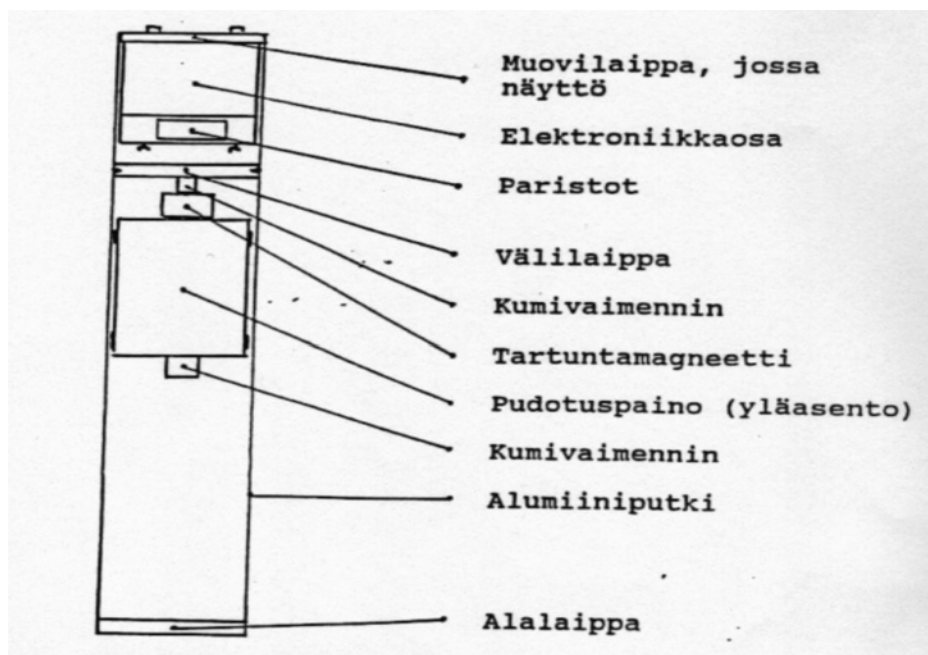
Liikenteen aiheuttama kuormitus aiheuttaa taipumaa tien rakenteeseen ja sen eri kerrosten materiaaleihin. Liikennekuormitusta voidaan simuloida pudotuspainolaitteella, jolla pystytään mittaamaan koetilanteen kohdistama voima ja sen aiheuttama taipuma tiehen. Pudotuspainolaitemittaus on vaihtoehto levykuormituslaitteistolle ja menetelmänä se on luonteeltaan dynaaminen, joten se kuvaa hyvin liikenteen aiheuttamaa kuormitusta. Paino pudotetaan yleensä 300 mm suuruiselle pyöreälle levyille, jossa on vaimennin. Pudotuskorkeus ja painon suuruus on säädettävissä, jolloin tiehen kohdistuvan kuorman arvoa voidaan vaihdella. Taipuma mitataan yleensä kuormituslevyn alta sekä usealla eri etäisyydellä kuormituslevystä. Näin saadaan mitattua taipumasuppilo. (Tiehallinto 2005)



Kuva 3.4. *Pudotuspainolaitteen mittausperiaate* (Tiehallinto 2005).

3.3.1 Kevyt pudotuspainolaite

Menetelmää voidaan käyttää sekä sitomattomien että ohuiden sidottujen rakenteiden kantavuusmittaukseen. Mittauksella voidaan selvittää rakenteen kantavuus 20...50 cm syvyydeltä. Syvyyteen vaikuttaa kuormituslevyn halkaisija ja periaatteena on, että mitä suurempi halkaisija sitä syvemälle mittaus voidaan ulottaa. Pohjalevyn halkaisijat kevyessä pudotuspainolaitteessa ovat 132...300 mm ja pudotuspainon massa on 10 kg. (PANK 2002)



Kuva 3.5. Kevyt pudotuspainolaite (PANK 2002).

Mittauksessa pudotuspainolaiteessa putoaa paino vapaasti jäykälle kuormituslevylle. Laite mittaa tästä kuormituksesta aiheutuvan painuman laitteeseen kiinnitetyllä kiihtyvyyssanturilla. Kiihtyvyyssignaalista laitteen elektroniikka laskee aika-siirtymäkäyrän, jossa maksimisiirtymä vastaa mitattua maksimipainumaa. Kuormitus välittyy kuormituslevyyn pudotuspainoon kiinnitetyn kumivaimentimen avulla. Kumivaimentimen ansiosta kuormitus kasvaa joustavasti maksimiarvoonsa. (PANK 2002)

Laitteen elektroniikka tulee kalibroida vähintään kerran vuodessa esimerkiksi mittauskauden alussa. (PANK 2002)

Mittauksen tekeminen aloitetaan laitteen asettamisella pystysuoraan mitattavalle kohteelle. Laite painetaan paikalleen käsin ja asetellaan paikoilleen niin, että pohjalevy koskettaa koko alaltaan mittauskohtaa. Tämän jälkeen painetaan pudotusnappia ja suoritetaan ensimmäinen mittaus. Tulos tallennetaan joko laitteen muistiin tai kirjataan ylös paperille. Seuraavat mittaukset tehdään samalla paikalla ja samaan tapaan, jolloin tuloksista saadaan suoraan tiiviysasteet ja E-moduulien arvot. (PANK 2002)

Mikäli käytetään isompia pohjalevyjä ($D=200\text{mm}$ tai 300mm) tulee levy asettaa mittauspaikalle ja astua sen päälle. Tällä tavalla saadaan tiivistettyä mittauskohtaa ja tämän jälkeen suoritetaan mittaukset pohjalevyn päältä. Pohjalevyä ei saa nostaa paikaltaan mittauksen aikana. Isompaa pohjalevyä käytetään, kun rakenteessa on hienojakoista materiaalia ja painuman ollessa yli $3\ldots 4\text{ mm}$. (PANK 2002)

Tarvittava pudotusten lukumäärä riippuu mittauskohteen ominaisuuksista. Kohteen ominaisuuksista merkitystä mittauksen kannalta on kiviaineksen materiaalilla, tiivistystyöllä ja kosteusolosuhteilla. Tavallisesti pudotusten lukumäärä on $3\ldots 6$ kertaa ja se määräytyy kokemuseräisesti. Yhden mittauksen tekemiseen kuluu yleensä aikaa noin $1\ldots 2\text{ min}$. (PANK 2002)

3.3.2 Heavy Loadman-pudotuspainolaite

Heavy Loadman-pudotuspainolaitteen kokonaispaino on noin 100 kg ja pudotuspainon osuus siitä on 50 kg. Laite voidaan asentaa henkilöauton perävaunuun tai pakettiauton sisätiloihin. Laitteeseen kuuluu lisäksi ohjausyksikkö, akut ja paineilmasylinteri pudotuspainon nostamiseen. Kuormituslevynä Heavy Loadman-pudotuspainolaitteessa käytetään 300 mm halkaisijaltaan olevaa teräslevyä ja pudotuspainon pudotuskorkeutena laitteessa käytetään 70 cm. Laite aiheuttaa 50 kN kuormitusvoiman ja kuormitusimpulssin kesto on noin 30 ms. (Gull 2011)

Heavy Loadman-pudotuspainolaitteen toiminta perustuu pudotuspainon aiheuttaman kuormituslevyn liikkeeseen. Pudotuspainon osuessa kuormituslevyyn rekisteröi anturi aiheutuneen kiihtyvyyden. Painuman mittausta tehdään joko kiihtyvyysanturin tai geofonin eli seismisen anturin avulla. Kimmomoduulin arvo E lasketaan integroimalla anturin saama mittaustulos taipumaksi. (Gull 2011)



Kuva 3.6. Heavy Loadman-pudotuspainolaite.

4 TIE- JA KATURAKENTEEN MITOITTAMINEN

Suunnittelussa tulisi miettiä kohteen kokonaisuutta ja arvioida sen perusteella suunnittelun vaatimuksia. Ennen mitoittamisen aloittamista tulee kohteesta tietää geotekniset vaatimukset ja muut tärkeät tekijät. Mikäli kohteeseen tehdään kevennysrakenne, täytyy silloin selvittää myös eri kevennysmateriaalien sopivuus kyseiseen kohteeseen. Kevennysmateriaalien ominaisuuksien varmennus voidaan osoittaa pääasiassa CE-merkinnällä. Toinen vaihtoehto materiaalien vaatimuksenmukaisuuden esittämiseen on materiaalin valmistajan dokumenttien perusteella ja lisäksi mahdollisesti rakennuskohteessa tehtävien kolmannen osapuolen kokeilla. Mitoittamisessa tulee suunnitella rakenteelle riittävä geotekninen varmuus, kuormituskestävyys ja routasuojaus. Geotekninen mitoitus tässä työssä käsittelee kevennysrakenteita, koska vaahtolasimurske on ominaisuuksiltaan kevennysmateriaali. (Liikennevirasto 2011)

4.1 Kuormituskestävyyssmitoitus

Kuormituskestävyyssmitoitus eli kantavuusmitoituksessa saadaan selville rakenteen kokonaiskantavuus halutun rakennekerroksen päältä. Kantavuudella tarkoitetaan rakenteen kykyä vastustaa muodonmuutosta rakennetta kuormitettaessa. Kantavuus voidaan ilmaista taipumana, jonka tietyn suuruinen kuormitus aiheuttaa sekä rakenteen näennäisenä kimmokertoimena eli E-moduulina. (Siika 2006)

Mitoituksessa käytetään Odemarkin mitoituskaavaa, jolla saadaan laskettua rakenteiden teoreettinen kantavuus. Mitoituksessa tulee tietää mitoitettavan kerroksen alapuolisen rakenteen kantavuus, mitoitettavan kerroksen materiaalin E-moduuliluku ja mitoitettavan kerroksen paksuus (Tiehallinto 2004). Odemarkin kaava on esitetty alla.

$$E_p = \frac{E_a}{\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + 0,81 \cdot \left(\frac{h}{a}\right)^2}}\right) \frac{E_a}{E} + \frac{1}{\sqrt{1 + 0,81 \cdot \left(\frac{h}{a}\right)^2} \left(\frac{E}{E_a}\right)^{2/3}}} \quad (4.1)$$

jossa

- E_p on mitoitettavan kerroksen päältä saavutettava kantavuus (MPa)
- E_a on mitoitettavan kerroksen alta saavutettava kantavuus (MPa)
- E on mitoitettavan kerroksen E-moduuli (MPa)
- h on mitoitettavan kerroksen paksuus (m)
- a on 0,15 m, kun kuormituslevyn halkaisija on 0,3 m

Lisäehtona kaavan käytölle on, että sitomattoman kerroksen suurin E-moduuli saa olla enintään $6 \cdot E_a$. Lisäksi yhteen liimatut, ehjät bitumilla sidotut kerrokset, joiden $E \geq 1500$ MPa, lasketaan yhdeksi kerrokseksi. Moduuli tälle kerrokselle lasketaan osakerrosten moduulien paksuuksien painotetusta keskiarvosta. Ehto täyttyy vain, kun AB-kerrosten bitumipitoisuus on vähintään 3,8 % ja massa on asemasekoitteista. Ainoastaan PAB-päällystettä sisältävissä rakenteissa täytyy bitumipitoisuuden olla vähintään 3,1 % ja E-moduulin vähintään 1400 MPa. Samassa rakenteessa olevia PAB- ja AB-kerroksia ei lasketa tässä tapauksessa yhteen liimatuiksi, vaan ne käsitellään erillisinä kerroksina. (Tiehallinto 2004)

Katurakenteen mitoittaminen tehdään katuluokittain. Kadut luokitellaan niiden liikenteellisen merkityksen mukaan katuluokkiin 1-6. Mitoittaminen kantavuuden mukaan tapahtuu vaadittavan tavoitekantavuuden perusteella. Katuluokilla on omat tavoitekantavuusarvonsa, joka mitoittamisen lopputuloksena tulisi saavuttaa (Katu 2002). Taulukossa 4.1 on esitetty katuluokat ja niiden tavoitekantavuudet.

Taulukko 4.1. Katuluokat ja niiden tavoitekantavuudet päällysteen pinnalta (Katu 2002).

Katuluokka	Kuvaus	Liikennemäärä (ajon./vrk)	Tavoitekantavuus
1	Erittäin raskaasti liikennöity moottori- tai pääkatu (ajokaistoja 2+2)	>30 000	550 MPa
2	Raskaasti liikennöity moottori- tai pääkatu (ajokaistoja 2+2)	10 000...30 000	420 MPa
3	Pääkatu, kokoojakatu- tai vilkasliikenteinen kerrostaloalueen asuntokatu (ajokaistoja 1+1)	2500...10 000	350 MPa
4	Asuntokatu tai pientaloalueen kokoojakatu Raskaiden ajoneuvojen pysäköintialueet	500...2500	250 MPa
5	Pientaloalueen asuntokatu tai huoltoliikenteen väylät Henkilöautojen pysäköintialueet	10...500	200 MPa
6	Jalkakäytävät, pyörätiet, puistotiet Ei ajoneuvoliikennettä		175 MPa

Katurakenteiden mitoituksessa tärkeää on tietää pohjamaan kantavuus ja sen lisäksi käytettävien materiaalien E-moduulit. Nämä tietäen voidaan mitoittaa katurakenteiden paksuudet ja koko rakenteen kokonaispaksuus (Katu 2002). Taulukossa 4.2 on esitetty katurakenteissa käytettävien materiaalien E-moduulit.

Taulukko 4.2. Materiaalien E-moduulit (Katu 2002).

Materiaali	E-moduuli (MPa)
Asfalttibetoni (AB, ABS)	2500
Kevytasfalttibetoni	1500
Kantavan kerroksen murske	200...350
Stabiloitu kantavan kerroksen murske	2000...2500
Jakavan kerroksen sora	150...280
Suodatinhiekkä	30...100

4.2 Routamitoitus

Tien pinnan routanousulle on annettu suunnitteluohjeissa suurin sallittu arvo, jota routanousu ei saa ylittää. Mittauksiin perustuvaa laatuvaatimusta ei voida kuitenkaan esittää, koska alimitoitus ei välttämättä tule näkyviin takuuajana. Pohjamaan ollessa sekalaatuista tulee myös routanousuista epätasaisia. Lohkareita sisältävässä pohjamaassa routanousuista tulee pysyviä ja tämän seurauksena tien kunto heikkenee paljon. Tästä syystä sekalaatuilla pohjamailla sallitaan pienemmät routanousut kuin tasalaatuilla. (Tiehallinto 2004)

Tasalaatuilla pohjamaalla routanoususta tulee tasaisempaa, mutta silti suuri routanousu aiheuttaa pituushalkeamia. Tämän lisäksi suuri routanousu tai epätasainen sulaminen aiheuttaa toistuessaan pysyviä muodonmuutoksia ja halkeamia. (Tiehallinto 2004)

Tien mitoituksessa vaatimuksena on laskennallinen routanousu (RN_{sall}), joka riippuu tien luokasta, pohjaolosuhteiden tasalaatuisuudesta ja rakenteen kestävydestä. Rakennuttaja voi myös hyväksyä muun routanousurajan, jos poikkileikkaus tai rakennetyyppi mahdollistaa routan tasaisemman sulamisen kuin tavanomaiset rakenteet. Taulukon 4.3 routanousurajat käsittävät valmiin rakenteen routanousua. Jos routanousun halutaan täyttävän raja-arvot jo rakennusvaiheessa, tulee rakenteen syvyyttä lisätä puuttuvan päällyskerroksen verran. Taulukossa 4.4 on esitetty materiaalien eristävyysarvoja ja kuvassa 4.1 ovat Suomessa käytetyt mitoitusroutansyvyyydet. (Tiehallinto 2004)

Taulukko 4.3. Vaatimusluokat ja suurin sallittu routanousu tiekohteissa (Tiehallinto 2004).

Vaatimusluokat V1...K2 ja niitä ku- vaavia tietoja mm. mitoitusnopeus	Suurin sallittu laskennallinen routanousu (RN _{sali})					Siirty- mäkii- lan kalte- vuus 1 : k ⁴⁾
	Tasalaatuinen pohjamaa ¹⁾			Sekalaatuinen pohjamaa ¹⁾		
	Ei teräsverkkoa		Teräsv erkko ³⁾	Ei teräs- verk- koa	Teräs- verkko ³⁾	
	Norm. tapaus	Louhe- rak- ym. ²⁾				
V1, Moottoriväylät (Mo, mol)	30	30	30	0	0	1:40
V2, Päätiät (Vt, Kt) 80 - 100 km/h	70	70	100	10	10	1:30
V3, Seudulliset tiät 80...100 km/h ja KVL > 1000 ajon/vrk	100	70	130	10	10	1:20
V4, Seudulliset tiät 60 km/h tai KVL < 1000 ja paikallisväylät KVL > 1000 ajon/vrk	130	70	160	30	100	1:15
V5, Paikallisväylät, KVL 400...1000 ajon/vrk	160	100	ei rajaa	70	130	1:15
R1, Reunatuellinen tai viemäroity, 80 km/h, KVL yli 1000 ajon/vrk	30	30	30	0	0	1:30
R2, Reunatuellinen tai viemäroity, 50...70 km/h, KVL yli 1000 ajon/vrk	70	70	100	0	0	1:30
R3, Reunatuellinen tai viemäroity, alle 50 km/h, KVL alle 1000 ajon/vrk	Paikallisen (kuntakohtaisen) käytännön mukaan					
K1, Kevyenliikenteentie, erillinen, päällystetty	70	70	160	30	130	1:10
K2, Kevyenliikenteentie, korotettu	Kuten ajoradalla					

1) Tasalaatuisuus ja sekalaatuisuus (epätasalaatuisuus) arvioidaan kohdan 3.3 mukaan.

2) Koskee louhetta, solumuovia tai sementtistabilointia (SST) sisältäviä rakenteita.

3) Teräsverkolla tarkoitetaan julkaisun Teiden suunnittelu IV 7 Rakenteen parantaminen (1991) kuvan 72:3 mukaista teräsverkkoa tai pituushalkeamien torjuntaan yhtä tehokkaaksi (pieni venymä) osoitettua verkkoa tai muuta ratkaisua.

4) Hiekkatäytteen siirtymäkiilan pohjan kaltevuus suhteessa tien tasausviivaan. Muista materiaaleista tehtävän kiilan pituus on sama kuin hiekkakiilan pituus, mukaan luettuna lämpöeristeistä tehtävät kiilat

Opinnäytetyössä tarkasteltavat kadut voidaan laskea kuuluvan vaatimusluokkaan R2 taulukon 4.3 mukaan. Sen mukaan katujen suurin sallittu routanousu olisi 70 mm. Mikäli pohjamaa on sekalaatuista tulee katurakenne mitoittaa routimattomaksi.

Kokonaan routimattomista materiaaleista tehdyn rakenteen laskennallisen routanousun laskeminen onnistuu kaavan 4.2 avulla. Mikäli rakenteessa käytetään lievästi routivia materiaaleja, saadaan routanousu laskettua kaavalla 4.3. Lievästi routivia materiaaleja ovat esimerkiksi moreenimurske jakavassa kerroksessa tai lievästi routiva suodatinhiekkä. (Tiehallinto 2004)

Katujen suurimmille sallituille routanousuille on esitetty taulukko 4.4, joka perustuu KATU 90:ssä annettuihin routanousun arvoihin. Tampereen kaupungilla on käytetty sallittuna routanousuna taulukon 4.4 mukaisia arvoja. Kaupungin käyttämät arvot sallituille routanousuille olivat vuodelta 2003. (Tekninen toimi 2003)

Taulukko 4.4. Katujen sallitut painumat ja routanousut (Katu 90).

Kohde	Aika			
	s / 5 v (mm)	F / 5 v (mm)	s / 20 v (mm)	F / 20 v (mm)
1. Pää- ja paikallis- väylät				
– asfaltti	100	75	200	120
– raitiotie	50	50	100	75
2. Hidas- ja pihakadut				
– asfaltti	100	100	200	150
– sora	125	120	250	175
– kiveys	50	75	100	120
3. Torit				
– asfaltti	75	100	150	150
– kiveys	50	75	100	100

s = painuma, F = routanousu

Routanousun laskemiseen käytettävät kaavat 4.2 ja 4.3:

$$RN_{lask} = (S - a_1 \cdot R_1 - a_2 \cdot R_2 \text{ jne.}) \cdot t / 100 \quad (4.2)$$

$$RN_{lask} = (S - a_1 \cdot R_1 - a_2 \cdot R_2 - a_{rva} \cdot R_{rva} \text{ jne.}) \cdot t / 100 + R_{rva} \cdot t_{rva} / 100 \quad (4.3)$$

jossa

RN_{lask} on laskennallinen routanousu (mm)

S on mitoitusroutansyvyys (mm)

R_i on routimattoman kerroksen paksuus (mm), i on kerroksen numero

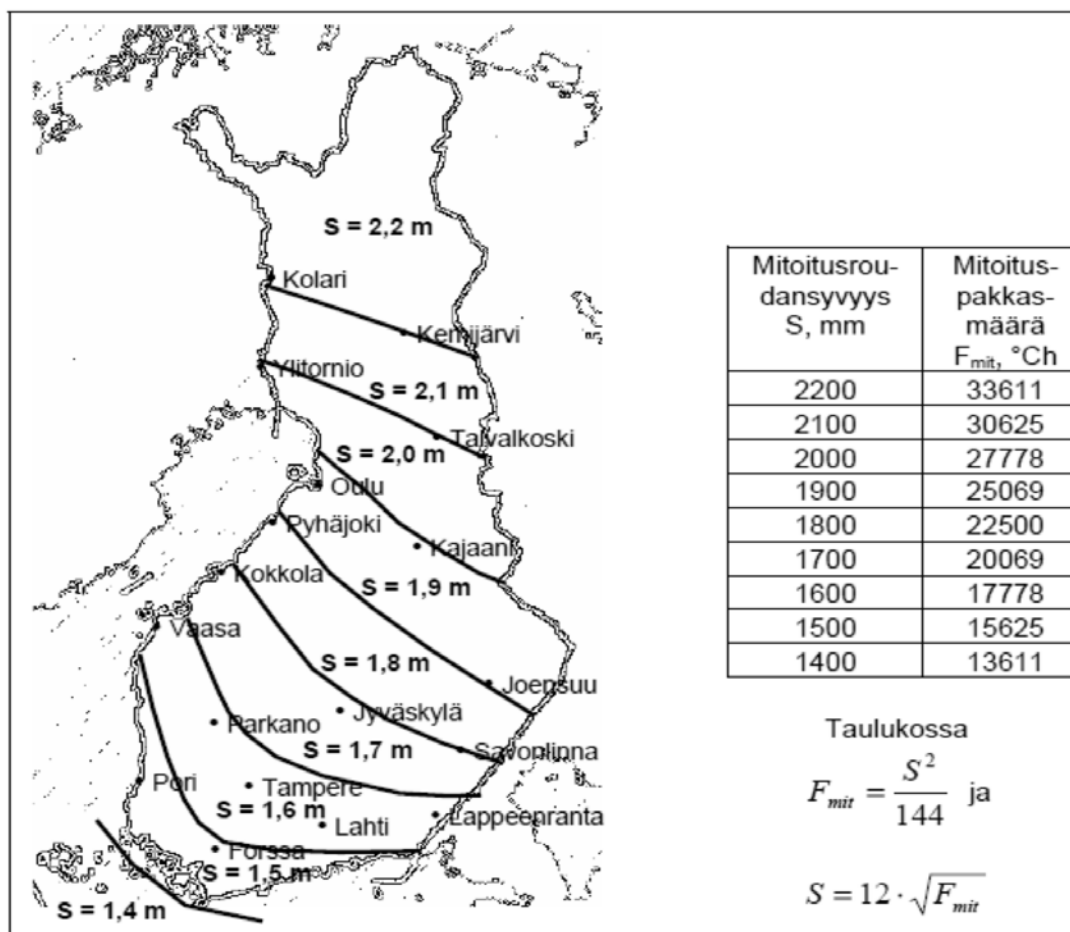
a_i on materiaalin vastaavuus eristävyiden kannalta (Taulukko 4.5)

t on alusrakenteen routaturpoama (%)

R_{rva} on routivan kerroksen paksuus (mm)

a_{rva} on routivan kerrosmateriaalin vastaavuus eristävyiden kannalta

t_{rva} on routivan kerrosmateriaalin routaturpoama (%)



Kuva 4.1. Mitoitusroudansyvyys Suomessa F_2 (RIL 261-2013).

Keskimääräisesti kylmempänä, kerran 10 vuoteen tapahtuvana talvena (pakkasmäärä F_{10}) routa tunkeutuu noin 0,5...0,9 m syvemmälle kuin kuvassa 4.1 olevat roudan syvyydet. Etelä-Suomessa mitoitusroudansyvyys olisi tällöin noin 2 metriä ja Pohjois-Suomessa se olisi 3 metriä. Mitoitusroudansyvyydellä saadaan paikkakuntakohtainen roudan syvyys, jota tarvitaan routanousun laskemisessa. Tavoitteena on että routiva pohjamaa ei pääsisi jäätymään ja samalla aiheuttaisi routimista.

Taulukko 4.5. Materiaalien eristävyys (Tiehallinto 2004).

Kerrosmateriaali	Materiaalin vastaavuus eristävyyden kannalta, a_i
Hiekka	1,0
Bitumilla sidotut	1,0
Sora, murske	0,9
Louhe	0,8
Kuonamurske, kappalekuona	1,6
Kuonahiekka, masuunihiekka	1,7
Kevytsora 0,7 m syvyydessä, kuivatiheys enintään 400 kg/m ³ , alla 0,15 m kuivatuskerros	4
Suulakepuristettu polystyreeni (XPS) 0,7 m syvyydessä, XPS:n alla 0,15 m kuivatuskerros	20
Paisutettu polystyreeni (EPS) 0,7 m syvyydessä, EPS:n alla 0,15 m kuivatuskerros	15
Vaahtolasimurske	4

4.3 Kevennysrakenteiden geotekninen mitoitus

Geotekninen mitoituksen tavoitteena on rakenteen kestävyys maaperässä tapahtuvien liikkeiden ja painumien välttämiseksi. Mitoituksessa tutkitaan maarakenteen vakavuus, painuma ja noste. (Liikennevirasto 2011)

Vakavuustarkastelu tehdään, kun epäillään maaperässä tapahtuvan liikkeitä tai pohjamaahan syntyvän murtotila. Tarkastelussa valitaan kevennyksen paksuus, laajuus ja materiaali siten, että varmuus sortumista vastaan on riittävä. Laskennassa tulisi huomioda myös materiaalien erikoispiirteet. Rakenteen vakavuuden mitoitus tehdään eurokoodi 7:n ja LVM:n kansallisen liitteen (NCCI 7) mukaan. (Liikennevirasto 2011)

Maarakennuskohteiden kuormitukset aiheuttavat painumia pohjamaalle ja heikosti kantavilla maaperillä painumat voivat olla haitallisen suuria. Painuma koostuu neljästä eri painumalajista: alkupainuma, konsolidaatiopainuma, plastinen painuma (leikkausjännityksistä johtuva) ja jälkipainumasta. Näistä painumalajeista konsolidaatio- ja jälkipainuma ovat kevennysrakenteita mitoittaessa merkittävimpinä. Mitoituksessa tulee ottaa huomioon maaperän ominaisuudet ja siihen kohdistuvat kuormat. Kevennysmateriaalin erityisominaisuudet tulee myös selvittää mitoitusta aloittaessa. (Liikennevirasto 2011)

Yleensä kevennysmitoituksessa on tavoitteena rakenne, joka aiheuttaa pienempiä kuormia kuin tavanomaisista kiviaineksista tehty rakenne. Rakenteet voidaan mitoittaa osittaiskevennyksenä tai kokonaiskevennyksenä. Osittaiskevennyksessä rakenne mitoitetetaan tavoitepainumalle. Osittaiskevennystä käytetään, kun painumien voidaan

olettaa tapahtuvan nopeasti tai suurin osa painumista on jo tapahtunut. Pohjavedenpinta voi olla myös yksi syy käyttää osittaiskevennystä. Rakennuskustannukset määrittävät lisäksi käytetäänkö osittais- vai kokonaiskevennystä rakennuskohteessa, jos molemmilla vaihtoehdoilla saadaan teknisesti hyväksyttävä ratkaisu. (Liikennevirasto 2011)

Kokonaiskevennys voidaan laskea poistettavan maakerroksen sekä kevennysmateriaalin ja rakennekerrosten materiaaliominaisuuksien perusteella. Kevennysmateriaalien ollessa pohjavedenpinnan yläpuolella käytetään kaavaa 4.4 ja mikäli osa kevennysmateriaaleista on pohjavedenpinnan alapuolella käytetään kaavaa 4.5. (Liikennevirasto 2011)

$$q_{\text{kaiv.maa}} \geq q_{\text{rak}} + q_{\text{kev}} \quad (4.4)$$

$$q_{\text{kaiv.maa}} \geq q_{\text{rak}} + q_{\text{kev}} + q_{\text{kev}}' + q_w \quad (4.5)$$

q_{rak} on rakennekerrosten kuorma pohjavedenpinnan yläpuolella ($\gamma_{\text{rak}} \cdot h_{\text{rak}}$)

q_{kev} on kevennysmateriaalin kuorma pohjavedenpinnan yläpuolella

($\gamma_{\text{kev}} \cdot h_{\text{kev}} + (\gamma_{\text{kev}} \cdot h_{\text{tä}})$)

q_{kev}' on kevennysmateriaalin kuorma pohjavedenpinnan alapuolella ($\gamma_{\text{kev}}' \cdot h_{\text{rak}}'$)

$q_{\text{kaiv.maa}}$ on kevennyskohdalta poistettu maan kuorma ($\gamma_{\text{maa}} \cdot h_{\text{kev}} + (\gamma_{\text{maa}}' \cdot h_{\text{kev}}')$)

q_w on rakentamisen aiheuttama pohjaveden alenemisen aiheuttama kuorma

($\gamma_{\text{maa}} - \gamma_{\text{maa}}') \cdot h_{\Delta w}$)

$h_{\Delta w}$ on pohjavedenpinnan alenema

γ_{rak} on rakennekerroksen ominaispaino

h_{rak} on rakennekerroksen paksuus

γ_{kev} on kevennyskerroksen ominaispaino

h_{kev} on kevennyskerroksen paksuus maanpinnan ja pohjavedenpinnan välillä

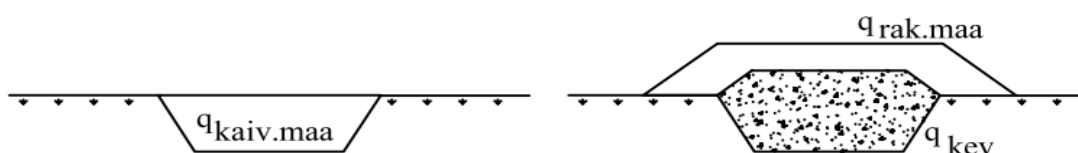
$h_{\text{tä}}$ on kevennyskerroksen paksuus maanpinnan yläpuolella

γ_{kev}' on pohjavedenpinnan alapuolella olevan kevennyskerroksen ominaispaino

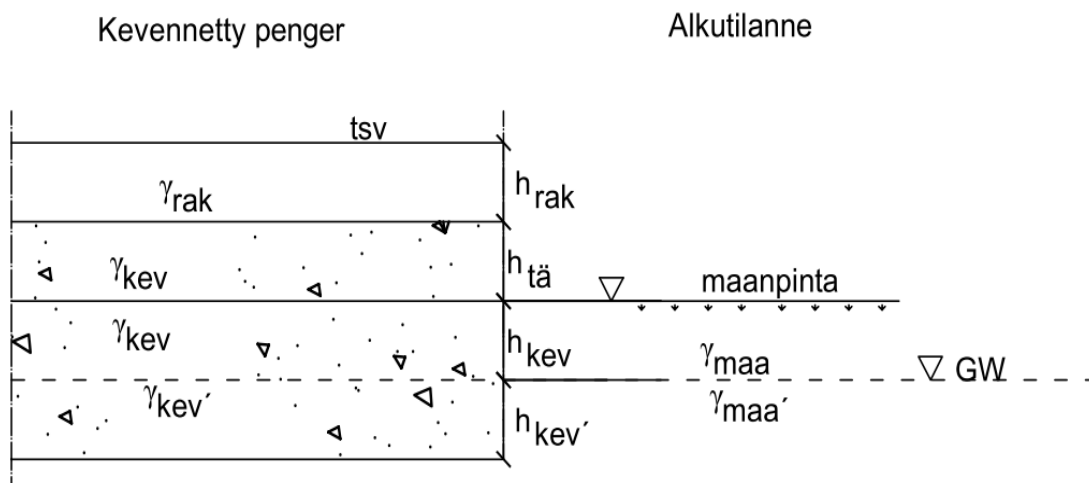
h_{kev}' on pohjavedenpinnan alapuolella olevan kevennyskerroksen paksuus

γ_{maa} on pohjavedenpinnan yläpuolella olevan maan ominaispaino

γ_{maa}' on pohjavedenpinnan alapuolella olevan maan ominaispaino



Kuva 4.2. Kokonaiskevennys pohjavedenpinnan yläpuolella (Liikennevirasto 2011).



Kuva 4.3. Yhtälöiden 5.1 ja 5.2 merkinnät (Liikennevirasto 2011).

Lisäksi tierakennuskohteissa voidaan kevennysrakenteet joutua mitoittamaan nosteelle. Katurakennuskohteissa nostemitoitusta ei yleensä ole tarpeellista tehdä, koska kaupunkiympäristössä vesien pois johtaminen on hoidettu niin tehokkaasti ettei nostetta pääse tapahtumaan. Nostemitoitus voidaan kuitenkin joutua tekemään kohteissa, joissa joudutaan tekemään normaalia maankaivua hieman syvempi massanvaihto ja pois kaivettava maa-aines korvataan kevennysrakenteella. Nostemitoituksessa kevennysrakenteen mitoitetaan kestävänsä pohjavedenpinnan nousun aiheuttamaa nostetta rakenteeseen. Tämä tapahtuu silloin, kun vedenpinta nousee rakenteeseen asti. (Liikennevirasto 2011)

Kevennysrakenteen mitoitusesimerkki

Ensimmäisessä mitoitusesimerkissä on laskettu kevennysrakenteen ja tavanomaisen rakenteen kuormitusero pohjamaalle. Toisessa esimerkissä on laskettu kevennysrakenteen syvyys, jolla pohjamaalle ei aiheudu lisäkuormitusta alkuperäiseen tilanteeseen verrattuna.

Maan ominaispaino: $\gamma_{maa} = 17 \text{ kN/m}^3$

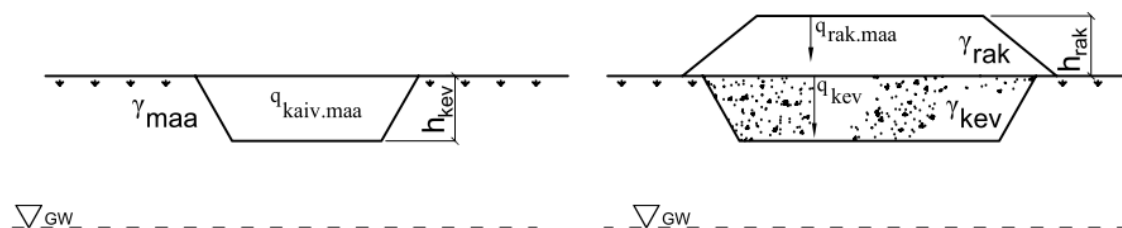
Penkereen ominaispaino: $\gamma_{rak} = 20 \text{ kN/m}^3$

Vaahtolasimurskeen ominaispaino: $\gamma_{kev} = 2,5 \text{ kN/m}^3$

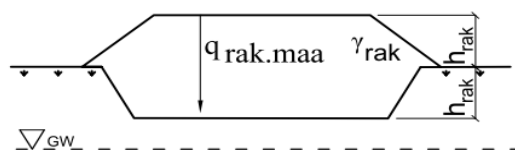
Kaivettavan maan syvyys ja kevennyskerroksen paksuus: $h_{kev} = 0,5 \text{ m}$

Rakennekerrosten paksuus: $h_{rak} = 0,5 \text{ m}$

Pohjavedenpinta on 2 metriä maanpinnan alapuolella.



Kuva 4.4. Kevennysrakenteen periaate.



Kuva 4.5. Tavanomainen rakenne.

Kevennysrakenteen ja tavanomaisen rakenteen kuormitusero

Kevennyksen kuormitusvaikutus saadaan laskettua, kun rakennettavan penkereen ja vaahtolasimurskeen painosta vähennetään kaivettavan maan paino.

$$q_{\text{kaiv.maa}} = 17 \text{ kN/m}^3 \cdot 0,5 \text{ m} = 8,5 \text{ kPa}$$

$$q_{\text{rak.maa}} = 20 \text{ kN/m}^3 \cdot 0,5 \text{ m} = 10 \text{ kPa}$$

$$q_{\text{kev}} = 2,5 \text{ kN/m}^3 \cdot 0,5 \text{ m} = 1,25 \text{ kPa}$$

Kevennysrakenteen kuormitus:

$$q_1 = (10 \text{ kPa} + 1,25 \text{ kPa}) - 8,5 \text{ kPa} = 2,75 \text{ kPa}$$

Tavanomaisen rakenteen kuormitus:

$$q_2 = 10 \text{ kPa} + 0,5 \text{ m} \cdot (20 - 17) \text{ kN/m}^3 = 11,5 \text{ kPa}$$

Kevennyksen vaikutus verrattuna tavanomaiseen rakenteeseen saadaan näiden kuormitusten erotuksesta:

$$q_2 - q_1 = 11,5 \text{ kPa} - 2,75 \text{ kPa} = 8,75 \text{ kPa}$$

Kevennysrakenteella saadaan tässä tapauksessa 8,75 kPa vähemmän kuormitusta pohjamaalle verrattuna tavanomaiseen rakenteeseen.

Kokonaiskevennys

Tässä mitoitusmerkissä kokonaiskevennys olisi saavutettu myös laskemalla jonkin verran kadun tasausta, mutta tässä tapauksessa kokonaiskevennystä on tavoiteltu suuremman kaivussyvyyden ja paksumman vaahtolasimurskekerroksen avulla. Kokonaiskevennyksen saavuttamiseksi selvitetään kuinka syvältä täytyy kaivaa, että päästään tilanteeseen jossa pohjamaalle ei tule ylimääräistä kuormaa rakentamisesta.

Kun kaivettavan maan syvyys ja kevennyskerroksen paksuus $h_{\text{kev}} = 0,7$ m ja rakennekerrosten paksuus $h_{\text{rak}} = 0,5$ m saadaan:

$$q_{\text{kaiv.maa}} = 17 \text{ kN/m}^3 \cdot 0,7 \text{ m} = 11,9 \text{ kPa}$$

$$q_{\text{rak.maa}} = 20 \text{ kN/m}^3 \cdot 0,5 \text{ m} = 10 \text{ kPa}$$

$$q_{\text{vaahtolasimurske}} = 2,5 \text{ kN/m}^3 \cdot 0,7 \text{ m} = 1,75 \text{ kPa}$$

$$q_1 = (10 \text{ kPa} + 1,75 \text{ kPa}) - 11,9 \text{ kPa} = - 0,15 \text{ kPa}$$

Kokonaiskevennys saavutetaan siis 0,7 metrin paksuisella kevennysrakenteella. Tällä kevennyskerroksen paksuudella pohjamaalle ei aiheudu lisäkuormitusta vaan kuormitus jopa vähenee 0,15 kPa alkuperäiseen tilanteeseen verrattuna.

5 VAAHTOLASIMURSKEEN KOEKOHDE

5.1 Kohteen yleisesittely

Tampereelle Vuoreksen kaupunginosaan rakennetaan Keskuspuistoa, johon tulee myös leikkikenttä Vuoreksen koulukeskuksen viereen. Opinnäytetyössä on tarkoitus tutkia vaahtolasimurskeen käyttöä rakentamisessa ja Vuoreksessa toteutettavaa vaahtolasimurskerakennetta. Vaahtolasimurskeesta tehty rakenne tulee leikkikentän kiviaidan alle noin 72 metrin pituudelta. Arinakerroksen suunniteltu paksuus oli noin 0,33...0,55 metriä ja leveys 1,5 metriä. Kokonaisuutena rakenteeseen käytetään noin 60 m³ vaahtolasimursketta. Leikkipuisto sijaitsee Vuoreksessa keskuspuiston eteläosassa ja sen sijainti on merkitty kuvaan 5.1.



Kuva 5.1. Leikkipuiston ja kiviaidan sijainti merkitty punaisella (Tampereen kaupunki 2013).

Vuores on osittain hyvin pehmeä pohjamaltaan ja paikoin pohjamaa koostuu paksuista turvekerroksista. Tällaisille aluille rakennettaessa muodostuu helposti painumia rakenteiden kuormituksen takia. Leikkikentän ympärille rakennettava kiviaita tulee aiheuttamaan kuormituksia pohjamaalle ja vaahtolasimurskearinnan tarkoituksena olisi estää liialliset painumat kevennysrakenteena toimimalla ja tasata painumaeroja kiviaidan vieressä olevan täytön välillä. Samalla vaahtolasimurskekerros toimii myös routaeristeenä, joka on tarpeen kiviaidan perustuksien takia.

Vuoreksen alueen pehmeän pohjamaan pystyi toteamaan paikan päällä ensimmäisessä työmaakatselmuksessa. Kuorma-autojen renkaiden alla maa jousti hyvin selvästi ja palautui sen jälkeen takaisin alkutilaan. Todennäköisesti tämän kaltaisen pohjamaan päälle rakennettaessa tulee myös painumia tapahtumaan ajan myötä.

5.2 Kohteen rakentaminen

Leikkipuiston rakentamisen ensimmäinen vaihe koostui rakennuspohjan tekemisestä ja maanpinnan muotoilemisesta. Ensimmäiseksi poistettiin alueelta pintamaa ja tämän jälkeen kaivettiin pohjamaa suunniteltuun syvyyteen. Aivan avokallion vieressä sijaitsi vesihuoltolinja, jonka kohdalta ei tarvinnut kaivaa. Pohjaolosuhteet olivat hyvin vaihtelevat leikkipuiston kohdalla, koska kallionpinta oli osassa puistoa lähellä maanpintaa ja osassa aluetta oli 5 metrin paksuinen savikerros ja sen alla vielä turvetta. Kuvassa 5.2 on leikkipuiston rakentamisen alkutilanne. Leikkipuiston viereltä sijaitsevalta kalliolta poistettiin puusto ja ylimääräinen kasvillisuus.



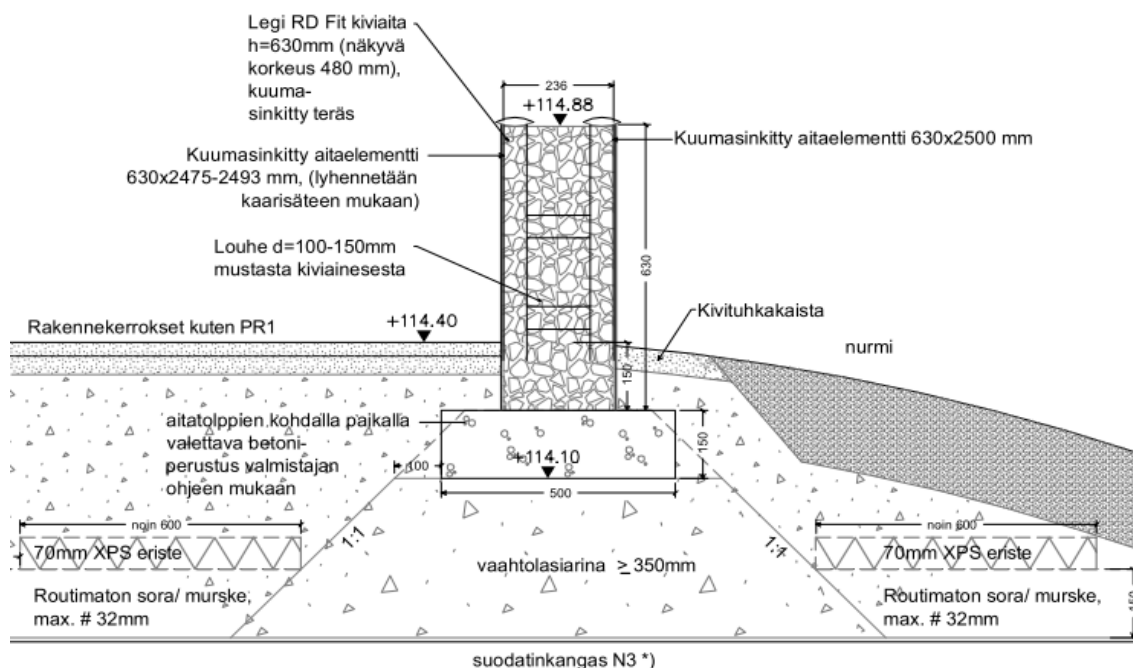
Kuva 5.2. *Leikkipuiston alueen rakentamista.*

Leikkipuiston alue oli hyvin pehmeää ja työmaakoneilla olikin vaikeuksia liikkua alueella. Alkuperäinen suunnitelma oli levittää suodatinkangas suoraan alkuperäisen maanpinnan päälle tai kevyen pintamaan poiston jälkeen ja sen päälle tehdä vaahtolasiarina. Koska koneet eivät voineet työskennellä kunnolla alueella, täytyi osaan pohjamaata tehdä massanvaihto, jossa vaihdettiin heikosti kantavaa savimaata louheeseen. Lisäksi louhekerroksen alle laitettiin suodatinkangas. Massanvaihdon syvyys oli noin yksi metri. Massanvaihto olisi voitu tehdä myös vaahtolasimursketta käyttäen, jolloin olisi saatu suurempi kevennysvaikutus, mutta vaahtolasimurskeen menekki olisi silloin ollut suurempi. Massanvaihto tehtiin vain pieneen osaan alueelle, kiviaidan kulkuaukon kohdalle. Kuva kiviaidan työalustan tekemisen alkutilanteesta on kuvassa 5.3.



Kuva 5.3. Työalustan tekemistä kiviaidan kulkuaukon kohdalle.

Kiviaidan suunniteltiin olevan 500 mm paksuisen vaahtolasimurskekerroksen pinnan päällä. Kiviaidan perustukset olivat taas suunnitelmien mukaan 200 mm pinnan alapuolella eli niiden alapuolella oli 300 mm vaahtolasimursketta. Poikkileikkaus suunnitellusta rakenteesta on kuvassa 5.4.



*)= Vaahtolasiarina on ympäröitävä suodatinkankaalla eli kangas asennetaan kaivupohjalle ja arinan yläpintaan.

Kuva 5.4. Lopullinen suunnitelma kiviaidan perustamisesta.

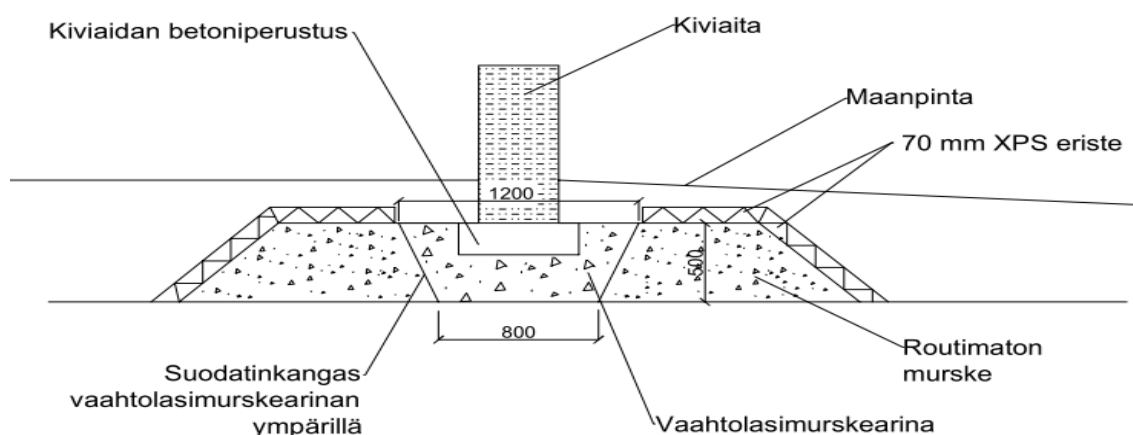
Kiviaita sijaitsee leikkipuiston reunassa ja sen vieressä on nurmikkoalue. Kuvassa 5.5 on murskeella rakennettu kiviaidan työalusta, jonka päälle rakenne tehtiin.



Kuva 5.5. Murskeella rakennettu työalusta, jolle kiviaidan vaahtolasimurskearina rakennettiin.

5.3 Rakenteen toteutus ja rakentamiskokemukset

Vaahtolasimurskerakenteen toteutus poikkesi hieman alkuperäisestä suunnitelmasta. Toteutuneessa rakenteessa vaahtolasimurskeen poikkileikkaus oli ylösalaisin käännetty eli rakenteen alapinta oli kapeampi kuin yläpinta. Tämä johtui rakentamisen teknisistä seikoista, koska tällä tavalla rakenne voitiin toteuttaa nopeammin. Vaahtolasimurske pysyi helpommin murskeseinien sisäpuolella ja tämän ansiosta se saatiin nopeasti oikeaan muotoonsa. (Eskola 2013)



Kuva 5.6. Kiviaidan toteutunut rakenne.

Kuvassa 5.7 näkyy toteumaratkaisu, jossa ensin tehtiin murskeesta tasainen kerros ja sen jälkeen kaivettiin uoma vaahtolasimurskeelle. Murskekerroksen reunat tasattiin vielä lopuksi oikeaan korkoon ja tämän jälkeen uoma pystytettiin täyttämään vaahtolasimurskeella. Toteutetussa rakenteessa pohjan leveys oli 800 mm ja vaahtolasimurskekerroksen yläpinnan leveys oli 1200 mm. Alkuperäisessä suunnitelmassa rakenteen ylä- ja alapinnan leveydet olivat päinvastaiset.



Kuva 5.7. Rakenteen reunat muotoiltiin murskeesta.

Kuvassa 5.8 on vaahtolasimurske lisätty rakenteeseen. Uoman pohjalle ja reunojen yli levitettiin lisäksi suodatinkangas materiaalin koossapysymisen varmistamiseksi.



Kuva 5.8. *Tiivistämätön vaahtolasimurskekerros.*

Urakoitsijan näkemyksen mukaan rakenne oli vaikea saada hyvin tasaiseksi, koska suuret vaahtolasimurskepartikkelit eivät asettuneet tasaisesti pienellä tärylevyllä tasoitettaessa. Tämän takia perustuksen valumuotin saaminen tasaisesti murskeen pinnalle oli hankalaa. Oikean koron tekeminen vaahtolasimurskeesta onnistui helpoiten, kun työntekijät poistivat ylimääräistä vaahtolasimursketta reilusti ja sen jälkeen lisäsivät sitä haluttuun korkoon asti. Hienosäätäminen materiaalilla oli haastavaa eikä materiaalin poistaminen ohuin kerroksin ollut helppoa. Lisäksi lopullinen vaahtolasimurskekerros jäi tiivistystyöstä huolimatta paikoittain löyhäksi. (Eskola 2013)

Tästä rakennuskohteesta voidaan kuitenkin todeta, että rakentamisen hankaluus johtui kohteen pienestä koosta, jolloin kunnollisten tiivistyskalustojen käyttö ei onnistunut. Katurakentamisessa tiivistäminen olisi ollut helpompaa, koska silloin olisi voitu käyttää tehokkaampaa tiivistyskalustoa kuin mitä tässä kohteessa oli käytössä.

Kuvassa 5.9 on valmis vaahtolasimurskearina ja kiviaidan perustukset. Tämän kerroksen päälle perustettiin kiviaita ja myös loput kiviaidan ympäröivistä rakenteista toteutettiin suunnitelmien mukaisesti.



Kuva 5.9. Vaahtolasimurskearina ja perustusten valut valmiina.

5.4 Kantavuusmittausten tulokset

Vaahtolasimurskearinan kohdalla tehtiin murskepintaisen työalustan kantavuusmittauksia Heavy Loadman-laitteistolla. Mittauksia tehtiin 12 eri mittauspisteestä kiviaidan kohdalta ja mittauspisteiden etäisyys oli noin 5 metriä. Mittauksissa tehtiin kaksi pudotusta samasta mittauspisteestä ja niistä saatiin kantavuusarvot E_1 ja E_2 . Ensimmäisten kantavuusmittausten tulokset on esitetty taulukossa 5.1.

Vaahtolasimurskearinan rakentamisen jälkeen tehtiin toiset kantavuusmittaukset arinan päältä. Mittauksessa käytettiin kannettavaa Loadman-laitetta, koska Heavy Loadman-laitteistoa ei pystytty ajamaan vaahtolasimurskearinan päälle. Loadman-laitteistolla mittaukset tehtiin samoista pisteistä kuin Heavy Loadman-laitteistolla.

Taulukko 5.1. Murskepintaisen työalustan kantavuusmittausten tulokset.

Piste	E_1 (MN/m ²)	E_2 (MN/m ²)	Suhde E_1 / E_2
1	67	86	1,28
2	51	105	2,06
3	43	82	1,91
4	100	179	1,79
5	97	162	1,67
6	59	102	1,73
7	79	111	1,41
8	51	104	2,04
9	60	126	2,10
10	48	101	2,10
11	77	139	1,81
12	58	106	1,83
Keskiarvo	66	117	1,81

Kantavuusarvot murskepintaisella työalustalla olivat kelvolliset. Toisen mittauskerran E_1 ja E_2 kantavuusmittausten tulokset ovat esitetty taulukossa 5.2. Mittausten alkuperäiset tulokset ovat liitteessä 1.

Taulukko 5.2. Vaahtolasimurskekerroksen päältä tehdyt kantavuusmittausten tulokset.

Piste	E_1 (MN/m ²)	E_2 (MN/m ²)	Suhde E_1 / E_2
1	21	36	1,74
2	18	31	1,73
3	29	46	1,55
4	17	38	2,42
5	16	30	1,85
6	15	30	1,97
7	16	37	2,28
8	16	33	2,08
9	14	30	2,16
10	18	35	1,91
11	19	36	1,91
12	14	29	2,00
Keskiarvo	16	33	1,9

Toisen mittauskerran kantavuusmittausten pieniin tuloksiin syyt voivat olla ainakin mittauslaitteisto, mittaustapa ja tiivistystyön lopputulos. Ensimmäinen mittaus tehtiin Heavyy Loadman-laitteistolla, jolla saadaan rakenteen kantavuusarvo syvemmältä kuin Loadman-laitteella. Näin ollen vaahtolasimurskeen päältä mitattu kantavuusarvossa ei saatu huomioitua pohjamaan kantavuutta vaan kantavuusarvo perustui pelkästään vaahtolasimurskekerroksen kantavuuteen. Lisäksi Loadman-laitteistossa pohjalevyn halkaisija oli vain 132 mm, joka on liian pieni vaahtolasimurskeen kantavuuden mittaamiseen. Suositeltavaa olisi käyttää 300 mm pohjalevyä ja kantavuusmittaukset tulisi tehdä vaahtolasimurskekerroksen päältä olevan tiivistetyn murskekerroksen pinnalta. Ongelmaksi muodostui myös tiivistyskalusto, jolla ei saatu kunnolla tiivistettyä vaahtolasimurskekerrosta. Tässä kohteessa kuitenkin vaahtolasimurskeen oli tarkoitus toimia vain kevennysratkaisuna, joten pienet kantavuusarvot eivät aiheuttaneet ongelmaa rakenteen toiminnalle.

6 TYYPPIPOIKKILEIKKAUKSET JA NIIDEN MITOITTAMINEN

6.1 Mitoitusperiaatteet

Mitoittamisessa tavoitteena on suunnitella kadun poikkileikkaus, jossa on sekä riittävä kuormituskestävyys että routakestävyys. Mitoituslaskelmissa on pyritty saavuttamaan riittävä routakestävyys ja kantavuusmitoitukseen perustuvalla menetelmällä tehdyssä kuormituskestävyysmitoituksessa hyväksyttävä kantavuusarvo rakenteen päältä. Tässä luvussa saatuja poikkileikkauksia on käytetty luvun 7 kustannusvertailuissa. Poikkileikkaukset on mitoitettu samanlaisiin pohjamaanolosuhteisiin ja käyttökohteisiin, jolloin kustannuslaskennassa pystytään vertailemaan tasapuolisesti erilaisia rakenneratkaisuja. Routamitoitus perustuu kappaleen 4.2 kaavoihin ja teoriaan. Kantavuusmitoitus pohjautuu kappaleen 4.1 kaavoihin ja teoriaan.

6.2 Tyypipoikkileikkaus 1, vertailurakenne

6.2.1 Kantavuusluokka E

Tarkastelu perustuu mitoitustuloksiin, joissa tavoitteena on katuluokan 5 tavoitekantavuus ja kadun routanousun suurin sallittu arvo. Katuluokassa 5 tavoitekantavuusarvo on 200 MPa. Laskennallisen routanousun suurimmaksi sallituksi arvoksi on valittu 70 mm, joka perustuu taulukon 4.3 arvoihin.

		E_p
50 mm	AB $E = 2500 \text{ MPa}$	209 MPa
200 mm	Murske 0-56 $E = 280 \text{ MPa}$	168 MPa
300 mm	Sora 0-100 $E = 200 \text{ MPa}$	113 MPa
700 mm	Hiekka $E = 70 \text{ MPa}$	53 MPa
kokonaispaksuus:	1250 mm	20 MPa

Kuva 6.1. Tyypipoikkileikkaus 1.

Taulukon 6.1 arvot on laskettu käyttäen kaava 6.1.

$$E_p = \frac{E_A}{\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + 0,81 \cdot \left(\frac{h}{a}\right)^2}}\right) \frac{E_A}{E} + \frac{1}{\sqrt{1 + 0,81 \cdot \left(\frac{h}{a}\right)^2} \left(\frac{E}{E_A}\right)^{2/3}}} \quad (6.1)$$

jossa

E_p on mitoitettavan kerroksen päältä saavutettava kantavuus (MPa)

E_A on mitoitettavan kerroksen alta saavutettava kantavuus (MPa)

E on mitoitettavan kerroksen E-moduuli (MPa)

h on mitoitettavan kerroksen paksuus (m)

a on 0,15 m

Taulukko 6.1. Tyypipoikkileikkauksen 1 kantavuusmitoitus, alusrakenteen kantavuusluokka E.

Kerros	E_A (MPa)	h (m)	E (MPa)	E_p (MPa)
Pohjamaa (saSi)			20	20
Hiekka	20	0,7	70	53
Sora (0-100)	51	0,3	200	113
Murske (0-56)	124	0,2	280	168
AB, murske (0-16)	178	0,05	2500	209
Yhteensä:		1,25 m		209 MPa

Tavanomaisella rakenneratkaisulla saadaan kantavuudeksi 209 MPa, joka on hieman yli tavoitekantavuuden 200 MPa.

Rakenteen routamitoitus on laskettu kaavan 6.2 mukaan ja routamitoituksessa käytetyt arvot ovat taulukossa 6.2

$$RN_{lask} = (S - a_1 \cdot R_1 - a_2 \cdot R_2 \text{ jne.}) \cdot t / 100 \quad (6.2)$$

RN_{lask} on laskennallinen routanousu (mm)

S on mitoitusroudansyvyys (mm)

R_i on routimattoman kerroksen paksuus (mm), i on kerroksen numero

a_i on materiaalin vastaavuus eristävyiden kannalta

t on alusrakenteen routaturpoama (%)

Taulukko 6.2. Tyypipoikkileikkauksen 1 routamitoitus, alusrakenteen kantavuusluokka E.

Kerros	R_i (m)	Materiaalikerroin (a)
AB	0,05	1
Murske (0-56)	0,2	0,9
Sora (0-100)	0,3	0,9
Hiekka	0,7	1
Kokonaispaksuus	1,25	

Routamitoituksessa on käytetty alusrakenteen routaturpoaman arvona $t = 16 \%$ ja mitoitusroudansyvyyden arvona $S = 1,6 \text{ m}$.

$$RN_{lask} = (1,6\text{m} - 1 \cdot 0,05 \text{ m} - 0,9 \cdot 0,2 \text{ m} - 0,9 \cdot 0,3 \text{ m} - 1 \cdot 0,7 \text{ m}) \cdot 0,16 = 64,0 \text{ mm}$$

Laskennalliseksi routanousuksi saadaan tällä poikkileikkauksella 64,0 mm, joka on hieman pienempi kuin sallittu routanousu 70 mm.

6.2.2 Kantavuusluokka F

Tarkastelu perustuu mitoituslukuun, joissa tavoitteena on katuluokan 5 tavoitekantavuus ja kadun routanousun suurin sallittu arvo. Katuluokassa 5 tavoitekantavuusarvo on 200 MPa ja routanousun suurin sallittu arvo on 70 mm.

		E_p
50 mm	AB $E = 2500 \text{ MPa}$	207 MPa
200 mm	Murske 0-56 $E = 280 \text{ MPa}$	167 MPa
400 mm	Sora 0-100 $E = 200 \text{ MPa}$	112 MPa
600 mm	Hiekka $E = 70 \text{ MPa}$	40 MPa
kokonaispaksuus:	1250 mm	10 MPa

Kuva 6.2. Tyypipoikkileikkaus 1.

Taulukko 6.3. Tyypipoikkileikkauksen 1 kantavuusmitoitus, alusrakenteen kantavuusluokka F.

Kerros	$E_A \text{ (MPa)}$	$h \text{ (m)}$	$E \text{ (MPa)}$	$E_p \text{ (MPa)}$
Pohjamaa (saSi)			20	10
Hiekka	10	0,6	70	40
Sora (0-100)	40	0,4	200	112
Murske (0-56)	112	0,2	280	167
AB, murske (0-16)	167	0,05	2500	207
Yhteensä:		1,25 m		207 MPa

Tavanomaisella rakenneratkaisulla saadaan kantavuudeksi 207 MPa, joka on hieman yli tavoitekantavuuden 200 MPa.

Taulukko 6.4. Tyypipoikkileikkauksen 1 routamitoitus, alusrakenteen kantavuusluokka F.

Kerros	R_i (m)	Materiaalikerroin (a)
AB	0,05	1
Murske (0-56)	0,2	0,9
Sora (0-100)	0,4	0,9
Hiekka	0,6	1
Kokonaispaksuus	1,25	

Routamitoituksessa on käytetty alusrakenteen routaturpoaman arvona $t = 16 \%$ ja mitoitusroutansyvyyden arvona $S = 1,6$ m.

$$RN_{\text{lask}} = (1,6\text{ m} - 1 \cdot 0,05\text{ m} - 0,9 \cdot 0,2\text{ m} - 0,9 \cdot 0,3\text{ m} - 1 \cdot 0,7\text{ m}) \cdot 0,16 = 64,0\text{ mm}$$

Laskennalliseksi routanousuksi saadaan tällä poikkileikkauksella 64,0 mm, joka on hieman pienempi kuin sallittu routanousu 70 mm.

6.3 Tyypipoikkileikkaus 2, vaahtolasimurskerakenne

6.3.1 Kantavuusluokka E

		E_p
50 mm	AB $E = 2500\text{ MPa}$	200 MPa
250 mm	Murske 0-56 $E = 280\text{ MPa}$	161 MPa
300 mm	Sora 0-100 $E = 200\text{ MPa}$	89 MPa
200 mm	Vaahtolasimurske $E = 70\text{ MPa}$	34 MPa
Kokonaispaksuus: 800 mm		20 MPa

Kuva 6.3. Tyypipoikkileikkaus 2.

Taulukko 6.5. Tyypipoikkileikkauksen 2 kantavuusmitoitus, alusrakenteen kantavuusluokka E.

Kerros	E_A (MPa)	h (m)	E (MPa)	E_P (MPa)
Pohjamaa			20	20
Vaahtolasimurske	20	0,2	70	34
Sora (0-100)	59	0,3	200	89
Murske (0-56)	59	0,25	280	161
AB, murske (0-16)	128	0,05	2500	200
Yhteensä:		0,80 m		200 MPa

Vaahtolasimurskerakenteella saadaan kantavuudeksi 200 MPa, joka on juuri tavoitekantavuus 200 MPa.

Taulukko 6.6. Tyypipoikkileikkauksen 2 routamitoitus, alusrakenteen kantavuusluokka E.

Kerros	h (m)	Materiaalikerroin (a)
AB	0,05	1
Murske (0-56)	0,25	0,9
Sora (0-100)	0,3	0,9
Vaahtolasimurske	0,2	4

Routamitoituksessa on käytetty alusrakenteen routaturpoaman arvona $t = 16 \%$ ja mitoitusroutansyvyyden arvona $S = 1,6$ m.

$$RN_{lask} = (1,6m - 1 \cdot 0,05 - 0,9 \cdot 0,25 - 0,9 \cdot 0,3 - 4 \cdot 0,2) \cdot 0,16 = 40,8 \text{ mm}$$

Laskennalliseksi routanousuksi saadaan tällä poikkileikkauksella 40,8 mm, joka on reilusti alle sallitun routanousun 70 mm.

6.3.2 Kantavuusluokka F

			E_p
50 mm	AB $E = 2500 \text{ MPa}$		207 MPa
300 mm	Murske 0-56 $E = 280 \text{ MPa}$		167 MPa
400 mm	Sora 0-100 $E = 200 \text{ MPa}$		84 MPa
200 mm	Vaahtolasimurske $E = 70 \text{ MPa}$		22 MPa
Kokonaispaksuus: 950 mm			10 MPa

Kuva 6.4. Tyypipoikkileikkaus 2.

Taulukko 6.7. Tyypipoikkileikkauksen 2 kantavuusmitoitus, alusrakenteen kantavuusluokka F.

Kerros	$E_A \text{ (MPa)}$	$h \text{ (m)}$	$E \text{ (MPa)}$	$E_P \text{ (MPa)}$
Pohjamaa			20	10
Vaahtolasimurske	10	0,2	70	22
Sora (0-100)	22	0,4	200	84
Murske (0-56)	84	0,3	280	167
AB, murske (0-16)	167	0,05	2500	207
Yhteensä:		0,95 m		207 MPa

Vaahtolasimurskerakenteella saadaan kantavuudeksi 207 MPa, joka on yli tavoitekantavuuden 200 MPa.

Taulukko 6.8. Tyypipoikkileikkauksen 2 routamitoitus, alusrakenteen kantavuusluokka F.

Kerros	h (m)	Materiaalikerroin (a)
AB	0,05	1
Murske (0-56)	0,3	0,9
Sora (0-100)	0,4	0,9
Vaahtolasimurske	0,2	4

Routamitoituksessa on käytetty alusrakenteen routaturpoaman arvona $t = 16 \%$ ja mitoitusroutansyvyyden arvona $S = 1,6 \text{ m}$.

$$RN_{\text{lask}} = (1,6\text{m} - 1 \cdot 0,05 - 0,9 \cdot 0,3 - 0,9 \cdot 0,4 - 4 \cdot 0,2) \cdot 0,16 = 19,2 \text{ mm}$$

Laskennalliseksi routanousuksi saadaan tällä poikkileikkauksella 19,2 mm, joka on reilusti alle sallitun routanousun 70 mm.

6.4 Tyypipoikkileikkaus 3, vaahtolasimurskerakenne hiekkakerroksella

Tyypipoikkileikkaus 3 on mitoitettu vain mahdollista jatkotutkimusta varten. Tarkempaa tietoa jatkotutkimuksen sisällöstä löytyy kappaleesta 8.3.

6.4.1 Kantavuusluokka E

		E_p
50 mm	AB $E = 2500 \text{ MPa}$	202 MPa
200 mm	Murske 0-56 $E = 280 \text{ MPa}$	162 MPa
300 mm	Sora 0-100 $E = 200 \text{ MPa}$	106 MPa
200 mm	Vaahtolasimurske $E = 70 \text{ MPa}$	47 MPa
200 mm	Hiekka $E = 70 \text{ MPa}$	34 MPa
Kokonaispaksuus:	950 mm	20 MPa

Kuva 6.5. Tyypipoikkileikkaus 3.

Taulukko 6.9. Tyypipoikkileikkauksen 3 kantavuusmitoitus, alusrakenteen kantavuusluokka E.

Kerros	E_A (MPa)	h (m)	E (MPa)	E_P (MPa)
Pohjamaa			20	20
Hiekka	20	0,2	70	34
Vahtolasimurske	34	0,2	70	47
Sora (0-100)	47	0,3	200	106
Murske (0-32)	106	0,2	280	162
AB	162	0,05	2500	202
Yhteensä:		0,95 m		202 MPa

Vahtolasimurskerakenteen ja sen alapuolella lisätyn hiekkakerroksen kokonaiskantavuudeksi saadaan 202 MPa, joka on yli tavoitekantavuuden 200 MPa.

Taulukko 6.10. Tyypipoikkileikkauksen 3 routamitoitus, alusrakenteen kantavuusluokka E.

Kerros	h (m)	Materiaalikerroin (a)
AB	0,05	1
Murske (0-56)	0,2	0,9
Sora (0-100)	0,3	0,9
Vahtolasimurske	0,2	4
Hiekka	0,2	1

Routamitoituksessa on käytetty alusrakenteen routaturpoaman arvona $t = 16 \%$ ja mitoitusroutansyvyyden arvona $S = 1,6$ m.

$$RN_{\text{lask}} = (1,6\text{m} - 1 \cdot 0,05 - 0,9 \cdot 0,2 - 0,9 \cdot 0,3 - 4 \cdot 0,2 - 0,2 \cdot 1) \cdot 0,16 = 16 \text{ mm}$$

Laskennalliseksi routanousuksi saadaan tällä poikkileikkauksella 16 mm, joka on reilusti alle sallitun routanousun 70 mm.

6.4.2 Kantavuusluokka F

		E_p
50 mm	AB $E = 2500 \text{ MPa}$	204 MPa
300 mm	Murske 0-56 $E = 280 \text{ MPa}$	164 MPa
200 mm	Sora 0-100 $E = 200 \text{ MPa}$	81 MPa
200 mm	Vaahtolasimurske $E = 70 \text{ MPa}$	42 MPa
300 mm	Hiekka $E = 70 \text{ MPa}$	28 MPa
Kokonaispaksuus:	1050 mm	10 MPa

Kuva 6.6. Tyypipoikkileikkaus 3.

Taulukko 6.11. Tyypipoikkileikkauksen 3 kantavuusmitoitus, alusrakenteen kantavuusluokka F.

Kerros	$E_A \text{ (MPa)}$	$h \text{ (m)}$	$E \text{ (MPa)}$	$E_p \text{ (MPa)}$
Pohjamaa			20	10
Hiekka	10	0,3	70	28
Vaahtolasimurske	28	0,2	70	42
Sora (0-100)	42	0,2	200	81
Murske (0-32)	81	0,3	280	164
AB	164	0,05	2500	204
Yhteensä:		1,05 m		204 MPa

Vaahtolasimurskerakenteen ja sen alapuolella lisätyn hiekkakerroksen kokonaiskantavuudeksi saadaan 204 MPa, joka on yli tavoitekantavuuden 200 MPa.

Taulukko 6.12. Tyyppipoikkileikkauksen 3 routamitoitus, alusrakenteen kantavuusluokka F.

Kerros	h (m)	Materiaalikerroin (a)
AB	0,05	1
Murske (0-56)	0,3	0,9
Sora (0-100)	0,2	0,9
Vahtolasimurske	0,2	4
Hiekka	0,3	1

Routamitoituksessa on käytetty alusrakenteen routaturpoaman arvona $t = 16 \%$ ja mitoitusroudansyvyyyden arvona $S = 1,6 \text{ m}$.

$$RN_{\text{lask}} = (1,6\text{m} - 1 \cdot 0,05 - 0,9 \cdot 0,3 - 0,9 \cdot 0,2 - 4 \cdot 0,2 - 1 \cdot 0,3) \cdot 0,16 = 0 \text{ mm}$$

Laskennalliseksi routanousuksi saadaan tällä poikkileikkauksella 0 mm eli rakenne on routimaton.

6.5 Tampereen kaupungin käyttämä rakenne

Alla on Tampereen kaupungin normaalisti käyttämä katurakenne katuluokan 5 kaduille. Kuvan 6.7 katurakennetta käytetään pohjamaan kantavuusluokille E ja F. (Kielo)

		E_p
50 mm	AB $E = 2500 \text{ MPa}$	219 MPa
150 mm	Murske 0-32 $E = 280 \text{ MPa}$	178 MPa
400 mm	Murske 0-90 $E = 280 \text{ MPa}$	141 MPa
400 mm	Hiekka $E = 70 \text{ MPa}$	45 MPa

Kokonaispaksuus: 1000 mm

Kuva 6.7. Tampereen kaupungin käyttämä katurakenne.

Taulukko 6.13. Tampereen kaupungin normaalisti käyttämän katurakenteen kantavuusmitoitus, alusrakenteen kantavuusluokka E.

Kerros	E_A (MPa)	h (m)	E (MPa)	E_P (MPa)
Pohjamaa			20	20
Hiekka	20	0,4	70	45
Murske (0-90)	45	0,4	280	141
Murske (0-32)	141	0,15	280	178
AB	178	0,05	2500	219
Yhteensä:		1,0 m		219 MPa

Tampereen kaupungin normaalisti käyttämällä rakenneratkaisulla saadaan kantavuudeksi 219 MPa, joka on yli tavoitekantavuuden 200 MPa.

Sallittu routanousu on Tampereen kaupungin ohjeiden mukaan 100 mm. Kyseinen rakennekerros on mitoitettu tämän routanousurajan mukaan, joten maksimiroutanousu kyseiselle rakennekerrokselle on tällöin 100 mm. (Tekninen toimi)

Taulukko 6.14. Kantavuusluokitus-taulukko vaahtolasimurskerakenteelle ja Tampereen kaupungin käyttämälle katurakenteelle.

	Vaahtolasimurskerakenne ilman alapuolista hiekkakerrosta			Tampereen kaupungin käyttämä katurakenne		
	Kantavuus			Kantavuus		
Pohjamaan kantavuus (MPa)	Jakava (MPa)	Kantava (MPa)	Päällyste (MPa)	Jakava (MPa)	Kantava (MPa)	Päällyste (MPa)
5	54	122	157	101	142	180
10	70	141	178	121	161	200
15	81	152	191	133	171	212
20	89	161	200	141	178	219
25	96	167	207	147	184	225
30	102	172	212	152	188	229
50	118	186	227	164	198	240
70	129	194	236	172	203	246

Vertailutaulukosta nähdään, että Tampereen kaupungin käyttämällä katurakenteella saadaan noin 20 MPa parempi kantavuusarvo päällysteen päältä kuin vaahtolasimurskerakenteella. Pohjamaan kantavuuden kasvaessa rakenteiden kantavuuserot kuitenkin pienenevät samalla. Kun pohjamaan kantavuus on 70 MPa, on päällysteen päältä saatavien kantavuusarvojen ero enää 10 MPa Tampereen kaupungin käyttämän rakenteen hyväksi. Mitoituksen osalta opinnäytetyössä tehtiin lisäksi laskentapohja kantavuuden ja routanousun mitoittamiseen Tampereen kaupungille. Siitä on esitetty näkymäkuva liitteessä 3.

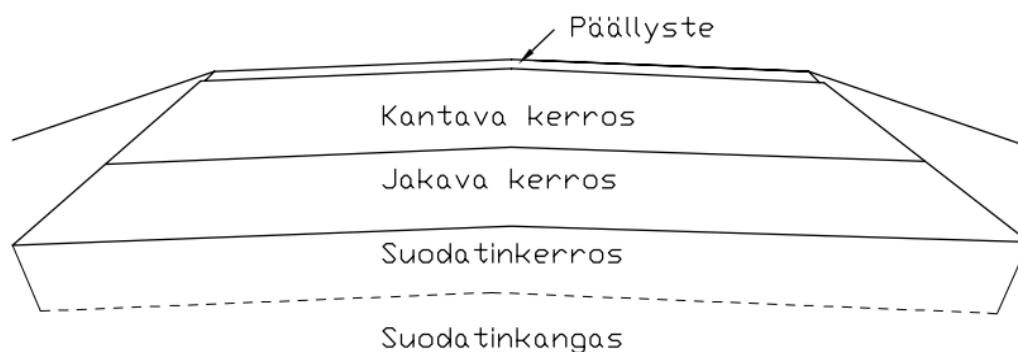
7 KUSTANNUSTEN TARKASTELU

Tämän luvun tavoitteena on tutkia vaahtolasimurskerakenteisen kadun kokonaiskustannuksia muihin tavanomaisiin maarakennusmateriaaleihin ja rakenneratkaisuihin verrattuna. Vaahtolasimurskeella rakennettaessa pystyttäisiin tekemään ohuempia rakenteita kuin tavanomaisilla kiviaineksilla, jolloin saadaan säästöjä rakentamisessa. Kustannuksiin vaikuttavat materiaalimenekin lisäksi kuljetuskustannukset ja rakentamiseen käytetty aika. Kustannusten osalta on tarkasteltu vain materiaalimenekkejä ja materiaalien hintoja. Laskelmissa on oletettu, että vaihtoehdot voidaan rakentaa yhtä nopeasti. Katu- rakentamisessa vaahtolasimurskeella rakentaminen on olettavasti yhtä nopeaa kuin tavanomaisilla kiviaineksilla, mutta esimerkiksi paksujen rakennekerrosten tekemisessä vaahtolasimurskeella voidaan tehdä nopeammin koko rakenne valmiiksi. Kappaleessa 2.1.2 kuvatussa Hämeenlinnan kohteessa vaahtolasimurskeen kerralla tiivistettävät kerrospaksuudet olivat paksummat kuin mitä tavanomaisilla kiviaineksilla ja sen ansiosta rakenne voitiin tehdä nopeammin valmiiksi.

7.1 Poikkileikkaukset ja materiaalimenekit pohjamaan kantavuusluokalle E

Poikkileikkaukset perustuvat luvun 6 mitoitustuloksiin. Vertailurakenne on tavanomainen ratkaisu, jossa suodatinkerros on hiekasta, jakava kerros sorasta, kantava kerros murskeesta ja päällyste asfaltista. Vaahtolasimurskerakenne on muutoin samanlainen kuin vertailurakenne paitsi suodatinhiekan sijasta siinä on vaahtolasimurskekerros. Tampereen kaupungin käyttämä katurakenne eroaa näihin kahteen muuhun rakenteseen sillä, että siinä on sallittuna routanousuna käytetty 100 mm. Vaahtolasimurskerakenteella ja vertailurakenteella sallittu routanousu on vain 70 mm. Kaikkien rakenteiden kantavuus on kuitenkin mitoitettu samaksi eli 200 MPa, joka on katuluokan 5 tavoite- kantavuus.

7.1.1 Tyypipoikkileikkaus 1, vertailurakenne



Kuva 7.1. Tyypipoikkileikkaus 1.

Päällyste:	AB 20 / 120	50 mm
Kantava:	murske	200 mm
Jakava:	sora	300 mm
Suodatin:	hiekkä	700 mm
kokonaispaksuus:		1250 mm

Pohjamaa (saSi, siMr)

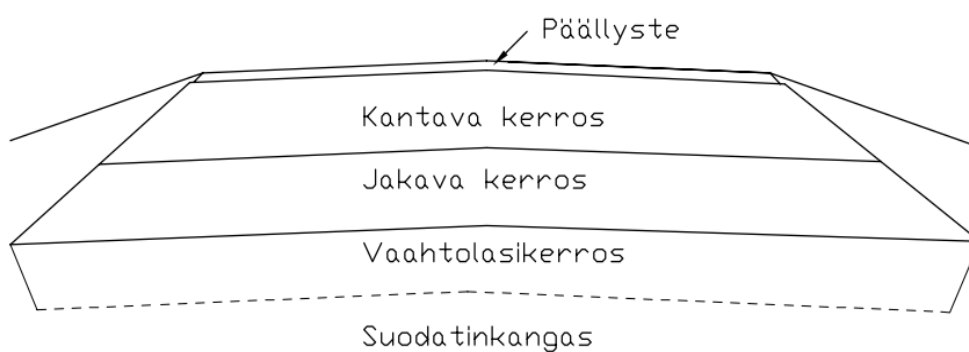
Kyseisellä rakenneratkaisulla saadaan routamitoitettu rakenne, jonka suurin laskennallinen routanousu on 65,6 mm.

Materiaalimenekki leveydeltään 6,5 metriä olevalle 100 metrin pituiselle katuosuudelle on esitetty taulukossa 7.1.

Taulukko 7.1. Tyypipoikkileikkauksen 1 mukainen materiaalimenekki.

Asfaltti	650 m ²
Kantava kerros	130 m ³
Jakava kerros	195 m ³
Suodatinkerros	455 m ³
Suodatinkangas	650 m ²
Maaleikkaus	812,5 m ³

7.1.2 Tyypipoikkileikkaus 2, vaahtolasimurskerakenne



Kuva 7.2. Tyypipoikkileikkaus 2.

Päällyste:	AB 20 / 120	50 mm
Kantava:	murske	250 mm
Jakava :	sora	300 mm
Vaahtolasi:	vaahtolasimurske	200 mm

Kokonaispaksuus: 800 mm

Pohjamaa (saSi, siMr)

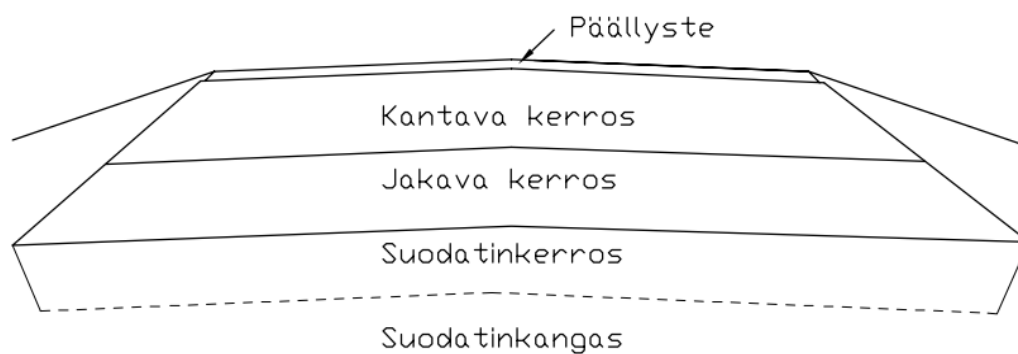
Kyseisellä rakenneratkaisulla saadaan routamitoitettu rakenne, jonka suurin laskennallinen routanousu on 48,0 mm.

Materiaalimenekki leveydeltään 6,5 metriä olevalle 100 metrin pituiselle katuosuudelle on esitetty taulukossa 7.2.

Taulukko 7.2. Tyypipoikkileikkauksen 2 mukainen materiaalimenekki.

Asfaltti	650 m ²
Kantava kerros	162,5 m ³
Jakava kerros	195 m ³
Vaahtolasimurskekerros	130 m ³
Suodatinkangas	650 m ²
Maaleikkaus	520 m ³

7.1.3 Tampereen kaupungin käyttämä rakenne



Kuva 7.3. Tampereen kaupungin käyttämä katurakenne.

Päällyste:	AB 20 / 120	50 mm
Kantava:	murske	150 mm
Jakava:	murske	400 mm
Suodatin:	hiekkä	400 mm
kokonaispaksuus:		1000 mm

Pohjamaa (saSi, siMr)

Kyseisellä rakenneratkaisulla saadaan routamitoitettu rakenne, jonka suurin laskennallinen routanousu on 100 mm.

Materiaalimenekki leveydeltään 6,5 metriä olevalle 100 metrin pituiselle katuosuudelle on esitetty taulukossa 7.3.

Taulukko 7.3. Tampereen kaupungin rakenteen mukainen materiaalimenekki.

Asfaltti	650 m ²
Kantava kerros	97,5 m ³
Jakava kerros	260 m ³
Suodatinkerros	260 m ³
Suodatinkangas	650 m ²
Maaleikkaus	650 m ³

7.2 Kustannusvertailu pohjamaan kantavuusluokalle E

Tapaus 1, kuljetusetäisyys enintään 1 km

Maaleikkaus sisältää kaivun, kuormauksen, kuljetuksen 1 kilometrin etäisyydellä olevaan läjityspaikkaan ja maamateriaalin vastaanoton. Suodatinkankaan kustannukset ovat materiaalin hankinta, kuljetus ja asennus. Suodatinkerroksen, jakavan kerroksen ja kantavan kerroksen hinnat sisältävät materiaalin, sen kuljetuksen 1 km säteeltä, levityksen ja tiivistämisen. Asfaltin hinta sisältää kuljetuksen, materiaalin, kaluston siirron, levityksen, tiivistyksen ja asfaltointiin liittyvät aputyöt (FORE-tietokanta 2013). Vaahtolasimurskeen hinta on 45 €/ m³itr, mutta vaahtolasimurskeen tiivistyessä materiaali-menekki kasvaa samalla. Vaahtolasimurskeen tiivistymisarvona on käytetty 1,25 ja se on huomioitu vaahtolasimurskeen hinnassa (Pekkala 2013). Vertailutaulukko perustuu FORE-tietokannasta saatuihin hintoihin. Hinnat on esitetty taulukossa 7.4.

Taulukko 7.4. Materiaalien kustannukset FORE-tietokannan mukaan.

Asfaltti AB 20 / 120	12,90 €/m ² tr
Kantava kerros (kalliomurske)	24,66 €/m ³ rtr
Jakava kerros (sorasta)	16,43 €/m ³ rtr
Suodatinkerros (hieka)	9,44 €/m ³ rtr
Suodatinkangas	1,48 €/m ² tr
Maaleikkaus	6,42 €/m ³ ktr

Taulukko 7.5. Tyyppipoikkileikkauksen 1 mukaisen vertailurakenteen kustannukset / 100m.

Asfaltti AB 20 / 120	12,90 €/m ² tr	650 m ² tr	= 8385 €
Kantava kerros (kalliomurske)	24,66 €/m ³ rtr	130 m ³ rtr	= 3206 €
Jakava kerros (sorasta)	16,43 €/m ³ rtr	195 m ³ rtr	= 3204 €
Suodatinkerros (hieka)	9,44 €/m ³ rtr	455 m ³ rtr	= 4296 €
Suodatinkangas	1,48 €/m ² tr	650 m ² tr	= 962 €
Maaleikkaus	6,42 €/m ³ ktr	812,5 m ³ ktr	= 5216 €
Yhteensä			= 25 268 €

Taulukko 7.6. Vaahtolasimurskerakenteen kustannukset / 100 m.

Asfaltti AB 20 / 120	12,90 €/m ² tr	650 m ² tr	= 8385 €
Kantava kerros (kalliomurske)	24,66 €/m ³ rtr	162,5 m ³ rtr	= 4007 €
Jakava kerros (sorasta)	16,43 €/m ³ rtr	195 m ³ rtr	= 3204 €
Vaahtolasimurske	56,25 €/m ³ rtr	130 m ³ rtr	= 7313 €
Suodatinkangas	1,48 €/m ² tr	650 m ² tr	= 962 €
Maaleikkaus	6,42 €/m ³ ktr	520 m ³ ktr	= 3338 €
Yhteensä			= 27 209 €

Taulukko 7.7. Tampereen kaupungin käyttämän katurakenteen kustannukset / 100 m.

Asfaltti AB 20 / 120	12,90 €/m ² tr	650 m ² tr	= 8385 €
Kantava kerros (kalliomurske)	24,66 €/m ³ rtr	97,5 m ³ rtr	= 2404 €
Jakava kerros (kalliomurske)	16,43 €/m ³ rtr	260 m ³ rtr	= 4272 €
Suodatinkerros (hieka)	9,44 €/m ³ rtr	260 m ³ rtr	= 2454 €
Suodatinkangas	1,48 €/m ² tr	650 m ² tr	= 962 €
Maaleikkaus	6,42 €/m ³ ktr	650 m ³ ktr	= 4173 €
Yhteensä			= 22 650 €

Taulukko 7.8. Kustannusvertailu Tampereen kaupungin käyttämän katurakenteen ja muiden katurakenteiden välillä. Kuljetusetäisyys enintään 1 km.

Rakennetyyppi	Hinta / 100 m (ero Tampereen kaupungin katuraken- teeseen)	Hinta verrattuna Tampereen kau- pungin katuraken- teeseen	Rakennepaksuus (ero Tampereen kaupungin katuraken- teeseen)
Tampereen kaupungin käyttämä katurakenne	22 650 €		1,0 m
Tyypipioikkileikka- uksen 1 mukainen vertailurakenne	25 268 €(+2618 €)	+ 10,4 %	1,25 m (+ 0,25 m)
Vaahtolasimurskera- kenne	27 209 €(+4559 €)	+ 16,8 %	0,8 m (- 0,2 m)

Taulukko 7.9. Kustannusvertailu tyypipioikkileikkauksen 1 mukaisen vertailurakenteen ja vaahtolasimurskerakenteen välillä. Kuljetusetäisyys enintään 1 km.

Rakennetyyppi	Hinta / 100 m (ero vertailurakentee- seen)	Hinta verrattuna vertailurakentee- seen	Rakennepaksuus (ero vertailura- kenteseen)
Tyypipioikkileikka- uksen 1 mukainen vertailurakenne	25 268 €		1,25 m
Vaahtolasimurskera- kenne	27 209 €(+1941 €)	+ 7,1 %	0,8 m (-0,45 m)

Tapaus 2, kuljetusetäisyys 2-3 km

Kuljetuksen hinta suodatin-, jakavalle- ja kantavalle kerrokselle on $1,27 \text{ €/m}^3\text{rtr}/3 \text{ km}$, kun kuljetusmatka on 2...3 km. Maaleikkauksen kustannukset ovat $1,31 \text{ €/m}^3\text{ktr}/3 \text{ km}$, kun kuljetusetäisyys on 2...3 km. (FORE-tietokanta 2013)

Vaahtolasimurskeen kuljetus tulisi olemaan matka välivarastointipaikasta työmaalle. Välivarastointipaikan oletetaan sijaitsevan yhtä kaukana työmaasta kuin kiviaineksen ottopaikka. Koska vaahtolasimurske on painoltaan selvästi kevyempää kuin tavanomainen kiviaines, myös kuljetuskustannukset tulevat olemaan pienemmät vaahtolasimurskeelle. Laskelmissa oletetaan, että vaahtolasimursketta voidaan tuoda kerralla kaksinkertainen määrä tavanomaisiin kiviaineksiin verrattuna. Tämä on huomioitu kuljetuksen lisäkustannuksissa, joissa vaahtolasimurskeen kuljetushinnat ovat puolet kiviainesten kuljetusten lisähinnasta. Vaahtolasimurskeen kuljetuskustannukset 2...3 km etäisyydeltä ovat tässä tapauksessa silloin $0,64 \text{ €/m}^3\text{rtr}/3 \text{ km}$.

Taulukko 7.10. Tyypipipoikkileikkauksen 1 mukaisen vertailurakenteen kustannukset / 100 m.

Asfaltti AB 20 / 120	$12,90 \text{ €/mtr}^2$	$650 \text{ m}^2\text{tr}$	= 8385 €
Kantava kerros (kallio-murske)	$(24,66 + 1,27)$ = $25,93 \text{ €/m}^3\text{rtr}$	$130 \text{ m}^3\text{rtr}$	= 3371 €
Jakava kerros (sorasta)	$(16,43 + 1,27)$ = $17,7 \text{ €/m}^3\text{rtr}$	$195 \text{ m}^3\text{rtr}$	= 3452 €
Suodatinkerros (hieka)	$(9,44 + 1,27)$ = $10,71 \text{ €/m}^3\text{rtr}$	$455 \text{ m}^3\text{rtr}$	= 4873 €
Suodatinkangas	$1,48 \text{ €/mtr}^2$	$650 \text{ m}^2\text{tr}$	= 962 €
Maaleikkaus	$(6,42 + 1,31)$ = $7,73 \text{ €/m}^3\text{ktr}$	$812,5 \text{ m}^3\text{ktr}$	= 6281 €
Yhteensä			= 27 323 €

Taulukko 7.11. Vaahtolasimurskerakenteen kustannukset / 100 m.

Asfaltti AB 20 / 120	$12,90 \text{ €/mtr}^2$	$650 \text{ m}^2\text{tr}$	= 8385 €
Kantava kerros (kallio-murske)	$(24,66 + 1,27)$ = $25,93 \text{ €/m}^3\text{rtr}$	$162,5 \text{ m}^3\text{rtr}$	= 4214 €
Jakava kerros (sorasta)	$(16,43 + 1,27)$ = $17,7 \text{ €/m}^3\text{rtr}$	$195 \text{ m}^3\text{rtr}$	= 3452 €
Vaahtolasimurske	$(56,25 + 0,64)$ = $56,89 \text{ €/m}^3\text{rtr}$	$130 \text{ m}^3\text{rtr}$	= 7395 €
Suodatinkangas	$1,48 \text{ €/mtr}^2$	$650 \text{ m}^2\text{tr}$	= 962 €
Maaleikkaus	$(6,42 + 1,31)$ = $7,73 \text{ €/m}^3\text{ktr}$	$520 \text{ m}^3\text{ktr}$	= 4020 €
Yhteensä			= 28 427 €

Taulukko 7.12. Tampereen kaupungin käyttämän katurakenteen kustannukset / 100m.

Asfaltti AB 20 / 120	12,90 €/m ²	650 m ² tr	= 8385 €
Kantava kerros (kallio-murske)	(24,66 + 1,27) = 25,93 €/m ³ rtr	97,5 m ³ rtr	= 2528 €
Jakava kerros (kallio-murske)	(16,43 + 1,27) = 17,7 €/m ³ rtr	260 m ³ rtr	= 4602 €
Suodatinkerros (hieka)	(9,44 + 1,27) = 10,71 €/m ³ rtr	260 m ³ rtr	= 2785 €
Suodatinkangas	1,48 €/m ²	650 m ² tr	= 962 €
Maaleikkaus	(6,42 + 1,31) = 7,73 €/m ³ ktr	650 m ³ ktr	= 5025 €
Yhteensä			= 24 287 €

Taulukko 7.13. Kustannusvertailu Tampereen kaupungin käyttämän katurakenteen ja muiden katurakenteiden välillä. Kuljetustäisyys 2-3 km.

Rakennetyyppi	Hinta / 100 m (ero Tampereen kaupungin katurakenteeseen)	Hinta verrattuna Tampereen kaupungin katurakenteeseen	Rakennepaksuus (ero Tampereen kaupungin katurakenteeseen)
Tampereen kaupungin käyttämä katurakenne	24 287 €		1,0 m
Tyypipoikkileikkauksen 1 mukainen vertailurakenne	27 323 €(+ 3036 €)	+ 11,1 %	1,25 m (+ 0,25 m)
Vaahtolasimurskerakenne	28 427 €(+ 4140 €)	+ 14,6 %	0,8 m (- 0,2 m)

Taulukko 7.14. Kustannusvertailu tyypipoikkileikkauksen 1 mukaisen vertailurakenteen ja vaahtolasimurskerakenteen välillä. Kuljetustäisyys 2-3 km.

Rakennetyyppi	Hinta / 100 m (ero vertailurakenteeseen)	Hinta verrattuna vertailurakenteeseen	Rakennepaksuus (ero vertailurakenteeseen)
Tyypipoikkileikkauksen 1 mukainen vertailurakenne	27 323 €		1,25 m
Vaahtolasimurskerakenne	28 427 €(+ 1104 €)	+ 3,9 %	0,8 m (-0,45 m)

Tapaus 3, kuljetusetäisyys 3-5 km

Kuljetuksen hinta suodatin-, jakavalle- ja kantavalle kerrokselle on 2,52 €/m³rtr/5 km, kun kuljetusmatka on 3...5 km. Maaleikkauksen kustannukset ovat 2,43 €/m³ktr/5 km, kun kuljetusetäisyys on 3...5 km. (FORE-tietokanta 2013)

Vaahtolasimurskeen kuljetuskustannukset ovat silloin 1,22 €/m³rtr/5 km. Tämä etäisyys voidaan olettaa olevan suurin kuljetusetäisyys vaahtolasimurskeelle, koska sen välivarastointipaikat voidaan sijoittaa kattavasti ympäri Tamperetta. Olettamuksena on, että Tampereen kaupunkiympäristössä sijaitsevien rakennuskohteiden läheltä löytyy vähintään 5 kilometrin säteeltä yksi vaahtolasimurskeen välivarastointipaikka.

Taulukko 7.15. Tyyppipoikkileikkauksen 1 mukaisen vertailurakenteen kustannukset / 100 m.

Asfaltti AB 20 / 120	12,90 €/mtr ²	650 m ² tr	= 8385 €
Kantava kerros (kallio-murske)	(24,66 + 2,43) =27,09 €/m ³ rtr	130 m ³ rtr	= 3522 €
Jakava kerros (sorasta)	(16,43 + 2,43) =18,86 €/m ³ rtr	195 m ³ rtr	= 3678 €
Suodatinkerros (hieka)	(9,44 + 2,43) = 11,87 €/m ³ rtr	455 m ³ rtr	= 5401 €
Suodatinkangas	1,48 €/mtr ²	650 m ² tr	= 962 €
Maaleikkaus	(6,42 + 2,52) =8,94 €/m ³ ktr	812,5 m ³ ktr	= 7264 €
Yhteensä			= 29 211 €

Taulukko 7.16. Vaahtolasimurskerakenteen kustannukset / 100 m.

Asfaltti AB 20 / 120	12,90 €/mtr ²	650 m ² tr	= 8385 €
Kantava kerros (kallio-murske)	(24,66 + 2,43) =27,09 €/m ³ rtr	162,5 m ³ rtr	= 4402 €
Jakava kerros (sorasta)	(16,43 + 2,43) =18,86 €/m ³ rtr	195 m ³ rtr	= 3678 €
Vaahtolasimurske	(56,25 + 1,22) =57,47 €/m ³ rtr	130 m ³ rtr	= 7471 €
Suodatinkangas	1,48 €/mtr ²	650 m ² tr	= 962 €
Maaleikkaus	(6,42 + 1,31) =7,73€/m ³ ktr	520 m ³ ktr	= 4649 €
Yhteensä			= 29 546 €

Taulukko 7.17. Tampereen kaupungin käyttämän katurakenteen kustannukset / 100 m.

Asfaltti AB 20 / 120	12,90 €/m ²	650 m ² tr	= 8385 €
Kantava kerros (kallio-murske)	(24,66 + 2,43) =27,09 €/m ³ rtr	97,5 m ³ rtr	= 2641 €
Jakava kerros (kallio-murskeesta)	(16,43 + 2,43) =18,86 €/m ³ rtr	260 m ³ rtr	= 4904 €
Suodatinkerros (hieka)	(9,44 + 2,43) = 11,87 €/m ³ rtr	260 m ³ rtr	= 3086 €
Suodatinkangas	1,48 €/m ²	650 m ² tr	= 962 €
Maaleikkaus	(6,42 + 2,52) =8,94 €/m ³ ktr	650 m ³ ktr	= 5811 €
Yhteensä			= 25 789 €

Taulukko 7.18. Kustannusvertailu Tampereen kaupungin käyttämän katurakenteen ja muiden katurakenteiden välillä. Kuljetusetäisyys 3-5 km.

Rakennetyyppi	Hinta / 100 m (ero Tampereen kaupungin katurakenteeseen)	Hinta verrattuna Tampereen kaupungin katurakenteeseen	Rakennepaksuus (ero Tampereen kaupungin katurakenteeseen)
Tampereen kaupungin käyttämä katurakenne	25 789 €		1,0 m
Tyypipoikkileikkauksen 1 mukainen vertailurakenne	29 211 €(+ 3422 €)	+ 11,7 %	1,25 m (+ 0,25 m)
Vaahtolasimurskerakenne	29 546 €(+ 3757 €)	+ 12,7 %	0,8 m (- 0,45 m)

Taulukko 7.19. Kustannusvertailu tyypipoikkileikkauksen 1 mukaisen vertailurakenteen ja vaahtolasimurskerakenteen välillä. Kuljetusetäisyys 3-5 km.

Rakennetyyppi	Hinta / 100 m (ero vertailurakenteeseen)	Hinta verrattuna vertailurakenteeseen	Rakennepaksuus m (ero vertailurakenteeseen)
Tyypipoikkileikkauksen 1 mukainen vertailurakenne	29 211 €		1,25 m
Vaahtolasimurskerakenne	29 546 €(+ 335 €)	+1,1 %	0,8 m (-0,45 m)

Tapaus 4, kuljetusetäisyys 5-10 km

Kuljetuksen hinta suodatin-, jakavalle- ja kantavalle kerrokselle on 3,76 €/m³rtr/10 km, kun kuljetusmatka on 5...10 km. Maaleikkauksen kustannukset ovat 3,88 €/m³ktr/10 km, kun kuljetusetäisyys on 5...10 km ja vaahtolasimurskeen 1,22 €/m³rtr/ 5 km. (FO-RE-tietokanta 2013)

Taulukko 7.20. Tyypipipoikkileikkauksen 1 mukaisen vertailurakenteen kustannukset / 100 m.

Asfaltti AB 20 / 120	12,90 €/m ² tr	650 m ² tr	= 8385 €
Kantava kerros (kallio-murske)	(24,66 + 3,76) =28,42 €/m ³ rtr	130 m ³ rtr	= 3695 €
Jakava kerros (sorasta)	(16,43 + 3,76) =20,19 €/m ³ rtr	195 m ³ rtr	= 3937 €
Suodatinkerros (hiekasta)	(9,44 + 3,76) = 13,20 €/m ³ rtr	455 m ³ rtr	= 6006 €
Suodatinkangas	1,48 €/m ² tr	650 m ² tr	= 962 €
Maaleikkaus	(6,42 + 3,88) =10,3 €/m ³ ktr	812,5 m ³ ktr	= 8369 €
Yhteensä			= 31 353 €

Taulukko 7.21. Vaahtolasimurskerakenteen kustannukset / 100 m.

Asfaltti AB 20 / 120	12,90 €/m ² tr	650 m ² tr	= 8385 €
Kantava kerros (kallio-murske)	(24,66 + 3,76) =28,42 €/m ³ rtr	162,5 m ³ rtr	= 4619 €
Jakava kerros (sorasta)	(16,43 + 3,76) =20,19 €/m ³ rtr	195 m ³ rtr	= 3937 €
Vaahtolasimurske	(56,25 + 1,22) =57,47 €/m ³ rtr	130 m ³ rtr	= 7471 €
Suodatinkangas	1,48 €/m ² tr	650 m ² tr	= 962 €
Maaleikkaus	(6,42 + 3,88) =10,3 €/m ³ ktr	520 m ³ ktr	= 5356 €
Yhteensä			= 30 730 €

Taulukko 7.22. Tampereen kaupungin käyttämän katurakenteen kustannukset / 100 m.

Asfaltti AB 20 / 120	12,90 €/m ² tr	650 m ² tr	= 8385 €
Kantava kerros (kallio-murske)	(24,66 + 3,76) =28,42 €/m ³ rtr	97,5 m ³ rtr	= 2771 €
Jakava kerros (sorasta)	(16,43 + 3,76) =20,19 €/m ³ rtr	260 m ³ rtr	= 5249 €
Suodatinkerros (hieka)	(9,44 + 3,76) = 13,20 €/m ³ rtr	260 m ³ rtr	= 3432 €
Suodatinkangas	1,48 €/m ² tr	650 m ² tr	= 962 €
Maaleikkaus	(6,42 + 3,88) =10,3 €/m ³ ktr	650 m ³ ktr	= 6695 €
Yhteensä			= 27 494 €

Taulukko 7.23. Kustannusvertailu Tampereen kaupungin käyttämän katurakenteen ja muiden katurakenteiden välillä. Kuljetusetäisyys 5-10 km.

Rakennetyyppi	Hinta / 100 m (ero Tampereen kaupungin katurakenteeseen)	Hinta verrattuna Tampereen kaupungin katurakenteeseen	Rakennepaksuus (ero Tampereen kaupungin katurakenteeseen)
Tampereen kaupungin käyttämä katurakenne	27 494 €		1,0 m
Tyypipoikkileikkauksen 1 mukainen vertailurakenne	31 353 €(+ 3859)	+ 12,3 %	1,25 m (+0,25 m)
Vaahtolasimurskerakenne	30 730 €(- 3321 €)	+ 10,8 %	0,8 m (-0,2 m)

Taulukko 7.24. Kustannusvertailu tyypipoikkileikkauksen 1 mukaisen vertailurakenteen ja vaahtolasimurskerakenteen välillä. Kuljetusetäisyys 5-10 km.

Rakennetyyppi	Hinta / 100 m (ero vertailurakenteeseen)	Hinta verrattuna vertailurakenteeseen	Rakennepaksuus m (ero vertailurakenteeseen)
Tyypipoikkileikkauksen 1 mukainen vertailurakenne	31 353 €		1,25 m
Vaahtolasimurskerakenne	30 730 €(- 538 €)	- 1,7 %	0,8 m (-0,45 m)

Tapaus 5, kuljetusetäisyys 10–15 km

Kuljetuksen hinta suodatin-, jakavalle- ja kantavalle kerrokselle on 3,88 €/m³rtr/15 km, kun kuljetusmatka on 10...15 km. Maaleikkauksen kustannukset ovat 3,76 €/m³ktr/15 km, kun kuljetusetäisyys on 10...15 km ja vaahtolasimurskeen 1,22 €/m³rtr/5 km. (FO-RE-tietokanta 2013)

Taulukko 7.25. Tyypipipoikkileikkauksen 1 mukaisen vertailurakenteen kustannukset / 100 m.

Asfaltti AB 20 / 120	12,90 €/m ² tr	650 m ² tr	= 8385 €
Kantava kerros (kallio-murske)	(24,66 + 5,30) =29,96 €/m ³ rtr	130 m ³ rtr	= 3895 €
Jakava kerros (sorasta)	(16,43 + 5,30) =21,73 €/m ³ rtr	195 m ³ rtr	= 4237 €
Suodatinkerros (hieka)	(9,44 + 5,30) = 14,74 €/m ³ rtr	455 m ³ rtr	= 6707 €
Suodatinkangas	1,48 €/m ² tr	650 m ² tr	= 962 €
Maaleikkaus	(6,42 + 5,51) =11,9 €/m ³ ktr	812,5 m ³ ktr	= 9693 €
Yhteensä			= 33 879 €

Taulukko 7.26. Vaahtolasimurskerakenteen kustannukset / 100 m.

Asfaltti AB 20 / 120	12,90 €/m ² tr	650 m ² tr	= 8385 €
Kantava kerros (kallio-murske)	(24,66 + 5,30) =29,96 €/m ³ rtr	162,5 m ³ rtr	= 4869 €
Jakava kerros (sorasta)	(16,43 + 5,30) =21,73 €/m ³ rtr	195 m ³ rtr	= 4237 €
Vaahtolasimurske	(56,25 + 1,22) =57,47 €/m ³ rtr	130 m ³ rtr	= 7471 €
Suodatinkangas	1,48 €/m ² tr	650 m ² tr	= 962 €
Maaleikkaus	(6,42 + 5,51) =11,9 €/m ³ ktr	520 m ³ ktr	= 6204 €
Yhteensä			= 32 128 €

Taulukko 7.27. Tampereen kaupungin käyttämän katurakenteen kustannukset / 100 m.

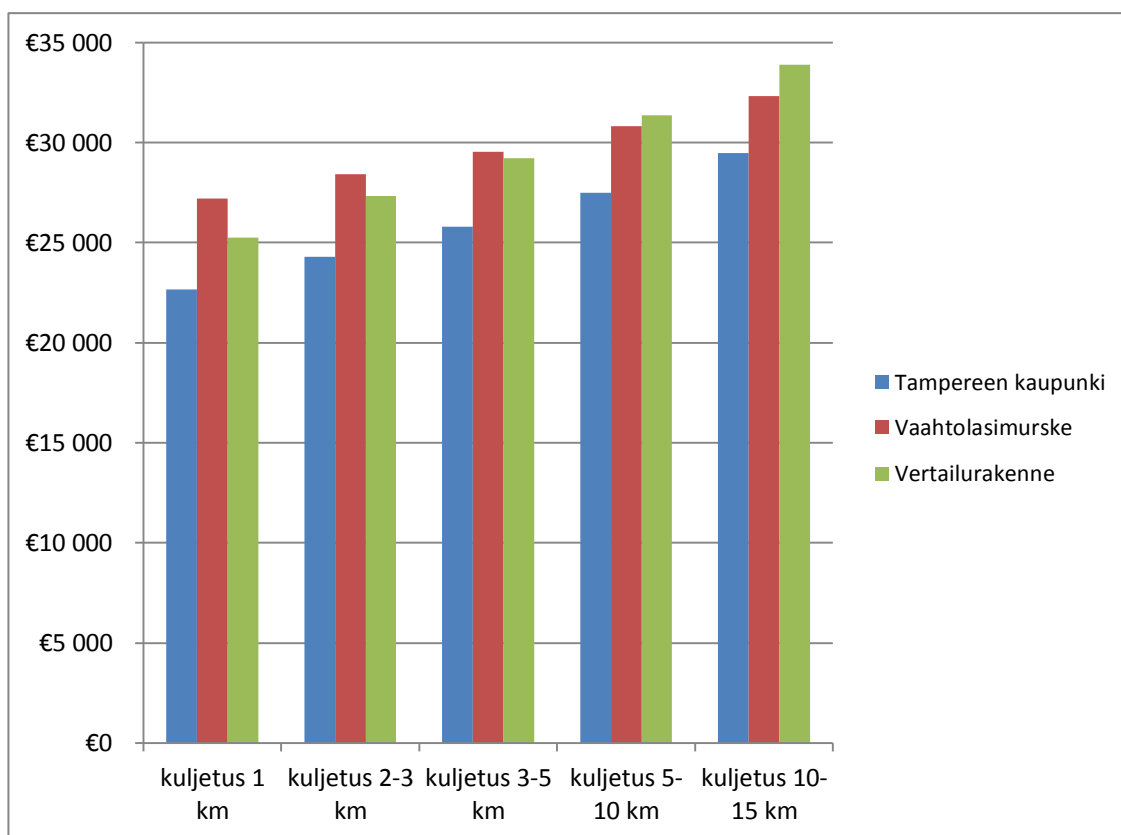
Asfaltti AB 20 / 120	12,90 €/m ² tr	650 m ² tr	= 8385 €
Kantava kerros (kallio-murske)	(24,66 + 5,30) =29,96 €/m ³ rtr	97,5 m ³ rtr	= 2921 €
Jakava kerros (sorasta)	(16,43 + 5,30) =21,73 €/m ³ rtr	260 m ³ rtr	= 5650 €
Suodatinkerros (hieka)	(9,44 + 5,30) = 14,74 €/m ³ rtr	260 m ³ rtr	= 3832 €
Suodatinkangas	1,48 €/m ² tr	650 m ² tr	= 962 €
Maaleikkaus	(6,42 + 5,51) =11,9 €/m ³ ktr	650 m ³ ktr	= 7735 €
		Yhteensä	= 29 485 €

Taulukko 7.28. Kustannusvertailu Tampereen kaupungin käyttämän katurakenteen ja muiden katurakenteiden välillä. Kuljetusetäisyys 10-15 km.

Rakennetyyppi	Hinta / 100m (ero Tampereen kaupungin katurakenteeseen)	Hinta verrattuna Tampereen kaupungin katurakenteeseen	Rakennepaksuus (ero Tampereen kaupungin katurakenteeseen)
Tampereen kaupungin käyttämä katurakenne	29 485 €		1,0 m
Tyypipoikkileikkauksen 1 mukainen vertailurakenne	33 879 €(+ 4394 €)	+ 13,0 %	1,25 m (+ 0,25 m)
Vaahtolasimurskerakenne	32 128 €(+ 2643 €)	+ 8,2 %	0,8 m (- 0,2 m)

Taulukko 7.29. Kustannusvertailu tyypipoikkileikkauksen 1 mukaisen vertailurakenteen ja vaahtolasimurskerakenteen välillä. Kuljetusetäisyys 10-15 km.

Rakennetyyppi	Hinta / 100 m (ero vertailurakenteeseen)	Hinta verrattuna vertailurakenteeseen	Rakennepaksuus m (ero vertailurakenteeseen)
Tyypipoikkileikkauksen 1 mukainen vertailurakenne	33 879 €		1,25 m
Vaahtolasimurskerakenne	32 128 €(- 1751 €)	- 5,1 %	0,8 m (-0,45 m)

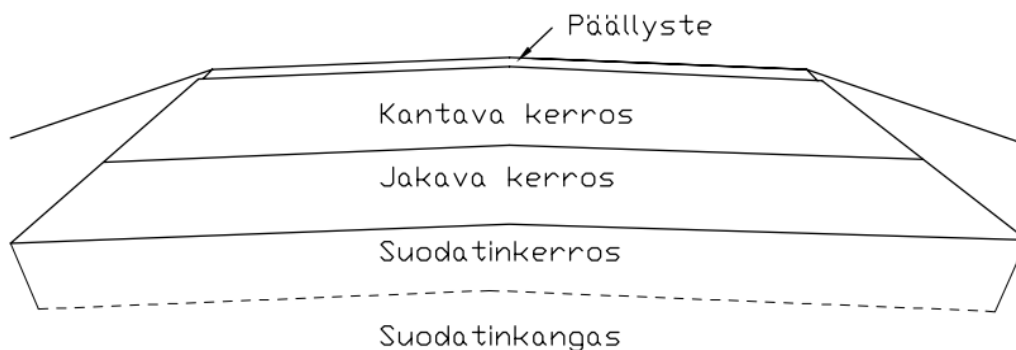


Kuva 7.4. Katurakenteiden kustannukset 100 metriä kohti eri kuljetusetäisyyksillä, kun pohjamaan kantavuusluokka on E (20 MPa).

7.3 Poikkileikkaukset ja materiaalimenekit pohjamaan kantavuusluokalle F

Seuraavissa tapauksissa on tutkittu molempien rakenteiden kustannuksia heikommin kantavilla pohjamaalla. Poikkileikkaukset perustuvat luvun 6 mitoitustuloksiin. Laskelmissa kadun pituutena on käytetty 100 m ja leveytenä 6,5 m.

7.3.1 Tyypipoikkileikkaus 1, vertailurakenne



Kuva 7.5. Tyypipoikkileikkaus 1.

Päällyste:	AB 20 / 120	50 mm
Kantava:	murske	200 mm
Jakava:	sora	400 mm
Suodatin:	hiekkä	600 mm
kokonaispaksuus:		1250 mm

Pohjamaa (saSi, siMr)

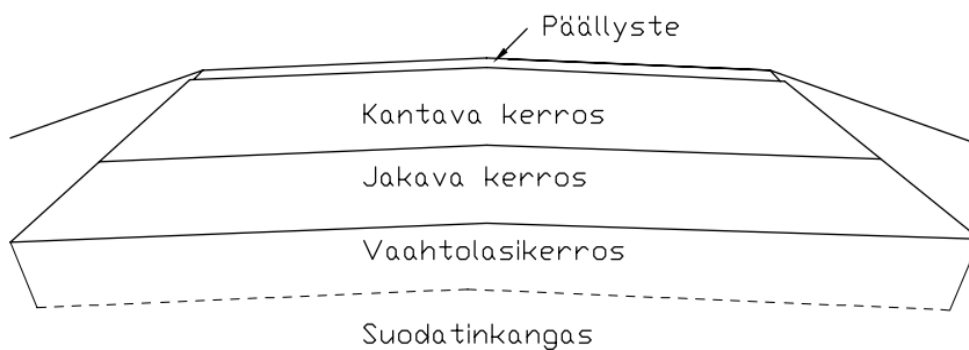
Kyseisellä rakenneratkaisulla saadaan routamitoitettu rakenne, jonka suurin laskennallinen routanousu on 40,8 mm.

Materiaalimenekki leveydeltään 6,5 metriä olevalle 100 metrin pituiselle katuosuudelle on esitetty taulukossa 7.30.

Taulukko 7.30. Tyypipoikkileikkauksen 1 mukainen materiaalimenekki.

Asfaltti	650 m ²
Kantava kerros	130 m ³
Jakava kerros	260 m ³
Suodatinkerros	390 m ³
Suodatinkangas	650 m ²
Maaleikkaus	812,5 m ³

7.3.2 Tyypipoikkileikkaus 2, vaahtolasimurskerakenne



Kuva 7.6. Tyypipoikkileikkaus 2.

Päällyste:	AB 20 / 120	50 mm
Kantava:	murske	300 mm
Jakava :	sora	400 mm
Vaahtolasi:	vaahtolasimurske	200 mm

Kokonaispaksuus: 950 mm

Pohjamaa (saSi, siMr)

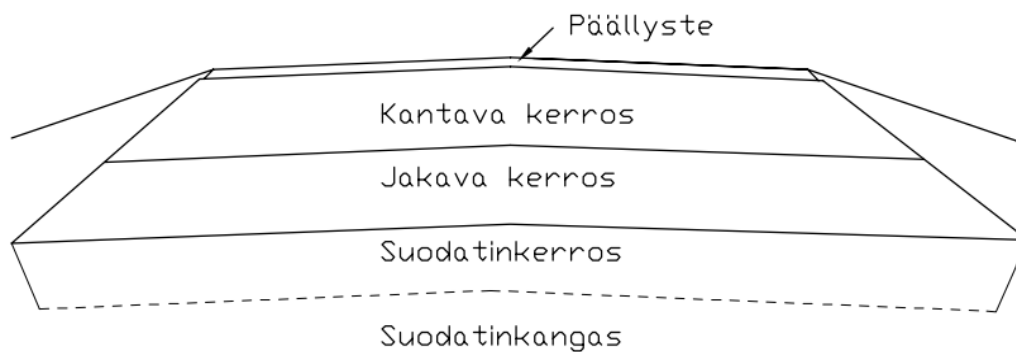
Kyseisellä rakenneratkaisulla saadaan routamitoitettu rakenne, jonka suurin laskennallinen routanousu on 19,2 mm.

Materiaalimenekki leveydeltään 6,5 metriä olevalle 100 metrin pituiselle katuosuudelle on esitetty taulukossa 7.31.

Taulukko 7.31. Tyypipoikkileikkauksen 2 mukainen materiaalimenekki.

Asfaltti	650 m ²
Kantava kerros	195 m ³
Jakava kerros	260 m ³
Vaahtolasimurskekerros	130 m ³
Suodatinkangas	650 m ²
Maaleikkaus	617,5 m ³

7.3.3 Tampereen kaupungin käyttämä rakenne



Kuva 7.7. Tampereen kaupungin käyttämä katurakenne.

Päällyste:	AB 20 / 120	50 mm
Kantava:	murske	150 mm
Jakava:	murske	400 mm
Suodatin:	hiekkä	400 mm
kokonaispaksuus:		1000 mm

Pohjamaa (saSi, siMr)

Kyseisellä rakenneratkaisulla saadaan routamitoitettu rakenne, jonka suurin laskennallinen routanousu on 100 mm.

Materiaalimenekki leveydeltään 6,5 metriä olevalle 100 metrin pituiselle katuosuudelle on esitetty taulukossa 7.32.

Taulukko 7.32. Tampereen kaupungin rakenteen mukainen materiaalimenekki.

Asfaltti	650 m ²
Kantava kerros	97,5 m ³
Jakava kerros	260 m ³
Suodatinkerros	260 m ³
Suodatinkangas	650 m ²
Maaleikkaus	650 m ³

7.4 Kustannusvertailu pohjamaan kantavuusluokalle F

Tulokset on esitetty vain lopullisista kustannuksista, koska kokonaiskustannukset muodostuvat samalla tavalla kuin edellisissä tapauksissa. Kuljetusmatkan kasvaessa myös rakennuskustannukset kasvavat ja ainoa ero on materiaalien määrissä näissä kahdessa eri kantavuusluokkien katurakenteissa.

Tapaus 1, kuljetusetäisyys enintään 1 km.

Taulukko 7.33. Kustannusvertailu Tampereen kaupungin käyttämän katurakenteen ja muiden katurakenteiden välillä. Kuljetusetäisyys enintään 1 km.

Rakennetyyppi	Hinta / 100 m (ero Tampereen kaupungin katurakenteeseen)	Hinta verrattuna Tampereen kaupungin katurakenteeseen	Rakennepaksuus (ero Tampereen kaupungin katurakenteeseen)
Tampereen kaupungin käyttämä katurakenne	22 650 €		1,0 m
Tyypipoikkileikkauksen 1 mukainen vertailurakenne	25 722 €(+ 3072 €)	+ 11,9 %	1,25 m (+ 0,25 m)
Vaahtolasimurskerakenne	29 704 €(+ 7054 €)	+ 23,7 %	0,9 m (-0,1 m)

Taulukko 7.34. Kustannusvertailu tyypipoikkileikkauksen 1 mukaisen vertailurakenteen ja vaahtolasimurskerakenteen välillä. Kuljetusetäisyys enintään 1 km.

Rakennetyyppi	Hinta / 100 m (ero vertailurakenteeseen)	Hinta verrattuna vertailurakenteeseen	Rakennepaksuus (ero vertailurakenteeseen)
Tyypipoikkileikkauksen 1 mukainen vertailurakenne	25 722 €		1,25 m
Vaahtolasimurskerakenne	29 704 €(+ 3 239 €)	+ 11,2 %	0,9 m (-0,35 m)

Tapaus 2, kuljetusetäisyys 2-3 km.

Taulukko 7.35. Kustannusvertailu Tampereen kaupungin käyttämän katurakenteen ja muiden katurakenteiden välillä. Kuljetusetäisyys 2-3 km.

Rakennetyyppi	Hinta / 100 m (ero Tampereen kaupungin katurakenteeseen)	Hinta verrattuna Tampereen kaupungin katurakenteeseen	Rakennepaksuus (ero Tampereen kaupungin katurakenteeseen)
Tampereen kaupungin käyttämä katurakenne	24 287 €		1,0 m
Tyypipoikkileikkauksen 1 mukainen vertailurakenne	27 777 €(+ 3490 €)	+ 12,6 %	1,25 m
Vaahtolasimurskerakenne	30 347 €(+ 6060 €)	+ 19,9 %	0,9 m (-0,35 m)

Taulukko 7.36. Kustannusvertailu tyypipoikkileikkauksen 1 mukaisen vertailurakenteen ja vaahtolasimurskerakenteen välillä

Rakennetyyppi	Hinta / 100 m (ero vertailurakenteeseen)	Hinta verrattuna vertailurakenteeseen	Rakennepaksuus (ero vertailurakenteeseen)
Tyypipoikkileikkauksen 1 mukainen vertailurakenne	27 777 €		1,25 m
Vaahtolasimurskerakenne	30 347 €(+ 2 570 €)	+ 8,5 %	0,9 m (-0,35 m)

Tapaus 3, kuljetusetäisyys 3-5 km.

Taulukko 7.37. Kustannusvertailu Tampereen kaupungin käyttämän katurakenteen ja muiden katurakenteiden välillä. Kuljetusetäisyys 3-5 km.

Rakennetyyppi	Hinta / 100 m (ero Tampereen kaupungin katurakenteeseen)	Hinta verrattuna Tampereen kaupungin katurakenteeseen	Rakennepaksuus (ero Tampereen kaupungin katurakenteeseen)
Tampereen kaupungin käyttämä katurakenne	25 789 €		1,0 m
Tyypipoikkileikkauksen 1 mukainen vertailurakenne	29 665 €(+ 3876 €)	+ 13,1 %	1,25 m (+0,25 m)
Vaahtolasimurskerakenne	31 621 €(+ 5832 €)	+ 18,4 %	0,9 m (-0,1 m)

Taulukko 7.38. Kustannusvertailu tyypipoikkileikkauksen 1 mukaisen vertailurakenteen ja vaahtolasimurskerakenteen välillä. Kuljetusetäisyys 3-5 km.

Rakennetyyppi	Hinta / 100 m (ero vertailurakenteeseen)	Hinta verrattuna vertailurakenteeseen	Rakennepaksuus (ero vertailurakenteeseen)
Tyypipoikkileikkauksen 1 mukainen vertailurakenne	29 665 €		1,25 m
Vaahtolasimurskerakenne	31 621 €(+ 1 955 €)	+ 6,2 %	0,9 m (-0,35 m)

Tapaus 4, kuljetusetäisyys 5-10 km.

Taulukko 7.39. Kustannusvertailu Tampereen kaupungin käyttämän katurakenteen ja muiden katurakenteiden välillä. Kuljetusetäisyys 5-10 km.

Rakennetyyppi	Hinta / 100 m (ero Tampereen kaupungin katurakenteeseen)	Hinta verrattuna Tampereen kaupungin katurakenteeseen	Rakennepaksuus (ero Tampereen kaupungin katurakenteeseen)
Tampereen kaupungin käyttämä katurakenne	27 494 €		1,0 m
Tyypipoikkileikkauksen 1 mukainen vertailurakenne	31 807 €(+ 4313 €)	+ 13,6 %	1,25 m (+ 0,25 m)
Vaahtolasimurskerakenne	32 979 €(+ 5485 €)	+ 16,6 %	0,9 m (-0,1 m)

Taulukko 7.40. Kustannusvertailu tyypipoikkileikkauksen 1 mukaisen vertailurakenteen ja vaahtolasimurskerakenteen välillä Kuljetusetäisyys 5-10 km.

Rakennetyyppi	Hinta / 100 m (ero vertailurakenteeseen)	Hinta verrattuna vertailurakenteeseen	Rakennepaksuus (ero vertailurakenteeseen)
Tyypipoikkileikkauksen 1 mukainen vertailurakenne	31 807 €		1,25 m
Vaahtolasimurskerakenne	32 979 €(+ 1 172 €)	+ 3,3 %	0,9 m (-0,35 m)

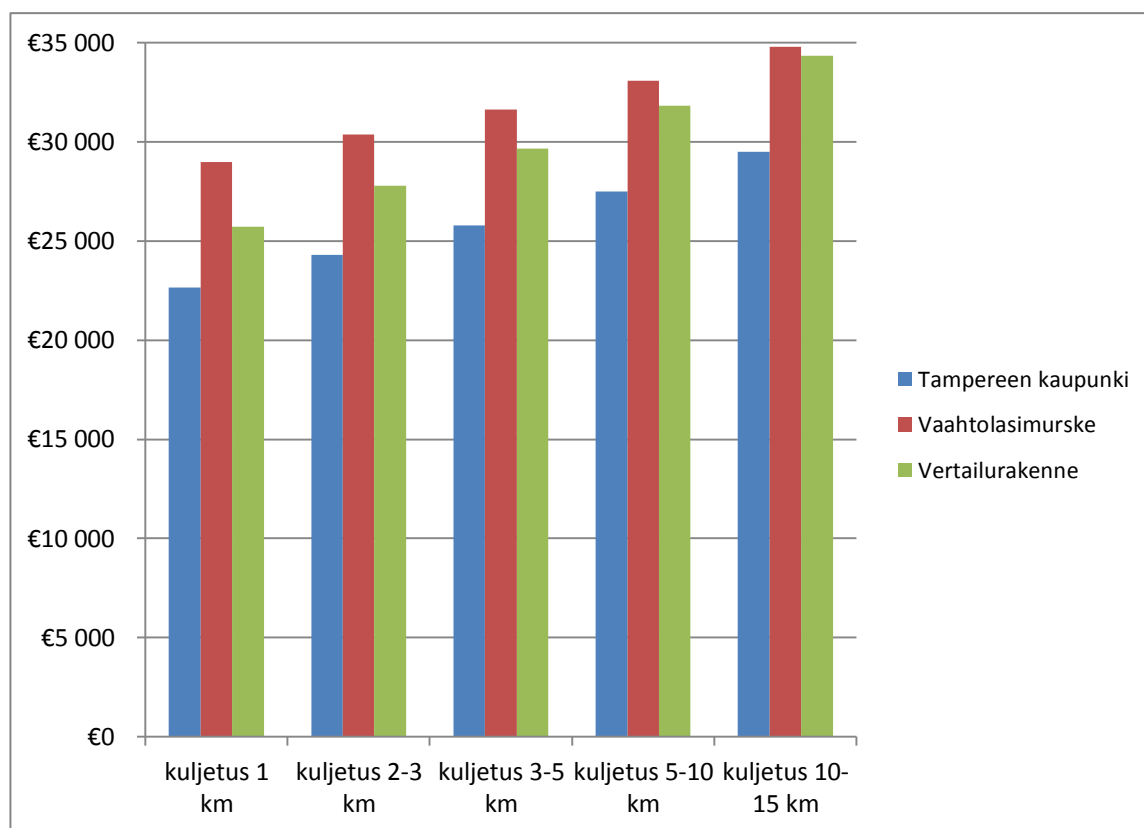
Tapaus 5, kuljetusetäisyys 10–15 km.

Taulukko 7.41. Kustannusvertailu Tampereen kaupungin käyttämän katurakenteen ja muiden katurakenteiden välillä. Kuljetusetäisyys 10-15 km.

Rakennetyyppi	Hinta / 100 m (ero Tampereen kaupungin katurakenteeseen)	Hinta verrattuna Tampereen kaupungin katurakenteeseen	Rakennepaksuus (ero Tampereen kaupungin katurakenteeseen)
Tampereen kaupungin käyttämä katurakenne	29 485 €		1,0 m
Tyypipoikkileikkauksen 1 mukainen vertailurakenne	34 333 €(+ 4848 €)	+ 14,1 %	1,25 m (+ 0,25 m)
Vaahtolasimurskerakenne	34 583 €(+ 5097 €)	+ 15,4 %	0,9 m (-0,1 m)

Taulukko 7.42. Kustannusvertailu tyypipoikkileikkauksen 1 mukaisen vertailurakenteen ja vaahtolasimurskerakenteen välillä Kuljetusetäisyys 10-15 km.

Rakennetyyppi	Hinta / 100 m (ero vertailurakenteeseen)	Hinta verrattuna vertailurakenteeseen	Rakennepaksuus (ero vertailurakenteeseen)
Tyypipoikkileikkauksen 1 mukainen vertailurakenne	34 333 €		1,25 m
Vaahtolasimurskerakenne	34 583 €(+ 250 €)	+ 0,7 %	0,9 m (-0,35 m)



Kuva 7.8. Katurakenteiden kustannukset 100 metriä kohti eri kuljetusetäisyyksillä, kun pohjamaan kantavuusluokka on F (10 MPa).

8 PÄÄTELMÄT JA JATKOTOIMENPIDESUOSITUKSET

8.1 Kustannusvertailujen tulokset

Kustannusvertailussa vertailtavina katurakenteina oli Tampereen kaupungin tavallisesti käyttämä rakenne, vaahtolasimurskerakenne ja tyyppipoikkileikkauksen 1 mukainen vertailurakenne. Tuloksia tarkasteltaessa on huomioitava, että Tampereen kaupungin tavallisesti käyttämässä katurakenteessa laskennallisen routanousun rajana oli 100 mm ja muissa rakenteissa vain 70 mm. Tämän takia vaahtolasimurskerakenteen ja tyyppipoikkileikkauksen 1 mukaisen vertailurakenteen laatutaso on parempi kuin Tampereen kaupungin tavallisesti käyttämässä rakenteessa.

Kustannusvertailu osoittaa, että Tampereen kaupungin käyttämä katurakenne oli kaikilla vertailtavilla kuljetusetäisyyksillä halvempi kuin siihen verratut katurakenteet. Kustannuksia verrattiin sekä pohjamaan kantavuusluokalla E että kantavuusluokalla F. Kun vertailtiin kaikkia rakenteita pohjamaan kantavuusluokalla E, olivat Tampereen kaupungin käyttämän katurakenteen ja vertailurakenteen suurimmat kustannuserot kuljetusetäisyyden ollessa 10...15 km. Tässä tapauksessa Tampereen käyttämä katurakenne oli 13,0 % halvempi. Pienin ero kustannuksissa oli alle 1 km kuljetusetäisyydellä ja silloin Tampereen käytännön mukainen katurakenne oli 10,4 % halvempi. Vaahtolasimurskerakenteinen katu oli samalla kantavuusluokalla taas kustannuksiltaan kalliimpi verrattuna Tampereen käyttämään katurakenteeseen kuljetusetäisyyden ollessa enintään 1 km. Silloin Tampereen käytännön mukaiseen katurakenteeseen verrattuna kustannukset olivat 16,8 % halvemmat. Kuljetusmatkan kasvaessa 10...15 kilometriin oli Tampereen kaupungin käyttämä katurakenne enää 8,2 % halvempi. Vertailurakenteen ja vaahtolasimurskerakenteen kustannusten vertailussa vertailurakenne oli halvempi, kun kuljetusten etäisyys oli enintään 1 km. Silloin se oli 7,1 % halvempi kuin vaahtolasimurskerakenne. Kun kuljetusmatka kasvoi 10...15 kilometriin, oli vaahtolasimurskerakenne taas 5,1 % halvempi.

Pohjamaan kantavuusluokalla F Tampereen kaupungin katurakenne oli halvempi vertailurakenteeseen verrattuna myös 10...15 kilometrin kuljetusetäisyydellä, jolloin se oli 14,1 % halvempi. Enintään 1 km kuljetusmatkalla Tampereen katurakenne oli 11,9 % halvempi kuin vertailurakenne. Vaahtolasimurskerakenne oli kustannuksiltaan kalliimpi verrattuna Tampereen käyttämään rakenteeseen, kun kuljetusmatka oli enintään 1 km, jolloin se oli 23,7 % kalliimpi. Pienin kustannusten ero näiden kahden rakenteen välillä oli 10...15 km kuljetusmatkalla ja silloin Tampereen katurakenne oli 15,4 % halvempi. Vertailurakenteen ja vaahtolasimurskerakenteen vertailussa vaahtolasimurs-

kerakenne oli kaikilla kuljetusmatkoilla kalliimpi. Kuljetusetäisyyden ollessa 10...15 km vertailurakenne oli 0,7 % halvempi ja enintään 1 km kuljetusetäisyydellä se oli 11,9 % halvempi.

8.2 Vaahtolasimurskeen käyttömahdollisuudet

Mitoituksessa saatiin kaikissa tapauksissa rakenteille riittävät kantavuudet, mutta vaahtolasimurskerakenteilla oli kuitenkin jokaisessa mitoitustuloksissa selvästi parempi roustaeristävyys. Suunnittelussa tulisikin huomioda rakennuskohteen mahdolliset routaongelmat, koska vaahtolasimurskeella pystytään estämään routiminen tehokkaammin kuin tavanomaisella rakenteella. Näin lisätään myös katurakenteen käyttöikää ja sen korjaamistarve vähenee tulevaisuudessa.

Pohjamaan kantavuusluokka vaikuttaa myös vaahtolasimurskeen käytön taloudellisuuteen. Pohjamaa kantavuuden ollessa 10 MPa joudutaan katukohteissa vaahtolasimurskerakenteesta tekemään paksumpia tavoitekantavuuden saavuttamiseksi. Tällaisia pohjamaita ovat esimerkiksi savi tai löyhä siltti. Koska vaahtolasimurskerakenteen paksuus kasvaa, niin samalla myös maaleikkauksia joudutaan tekemään enemmän ja sen takia myös kokonaiskustannuksista tulee suuremmat kuljetusmatkan kasvaessa. Kuitenkin heikosti kantavilla pohjamailla on yleensä myös painumaongelmia, joita voidaan vähentää vaahtolasimurskeen käytöllä.

Vaahtolasimurskeella on kaupunkiympäristössä hyvin paljon erilaisia käyttökohteita. Käyttökohteina voi olla esimerkiksi kadun rakennekerros, tukimuurin taustatäyttö, siltojen penkereiden kevennysratkaisut ja Vuoreksen kohteen kaltainen pienemmän rakennuskohteen painumien vähentäminen kevennysratkaisuna.

Vaahtolasimurskeen käyttö maarakentamisessa ei ole ympäristön kannalta tutkimusten mukaan ongelmallista. Vaahtolasimurskeen haitta-aineista suurimmat liukenemispitoisuudet ovat arseenilla ja antimonilla. Tampereen kaupungin rakennuskohteissa arseeni ei aiheuttaisi suurta haittaa ympäristölle, koska Pirkanmaalla pohjamaan arseenipitoisuudet ovat suuremmat kuin muualla Suomessa ja sen takia haitta-ainepitoisuudet eivät tulisi kasvamaan selvästi ainakaan arseenin osalta. Pohjavedenottoalueilla pohjaveden virtaus tulee laimentamaan muutkin haitta-aineet, joten sen käyttö on myös silloin hyväksyttävää. Ympäristön kannalta voidaankin todeta vaahtolasimurskeen sopivan hyvin maarakentamiseen ja eikä sen käyttöön liity rajoituksia ympäristönäkökulmien kannalta.

Vaahtolasimurskeen käyttö suodatinhiekan korvaajana ainakin Tampereen kaupungin rakennuskohteissa voisi olla hyödyllistä jatkossa. Hiekka joudutaan yleensä kuljettamaan kauempaa Tampereelle ja sen saatavuus voi huonontua tulevaisuudessa. Tämän takia vaahtolasimurskeen hyödyntämisellä voitaisiin säästää luonnon hiekkaa jatkossa.

8.3 Jatkotutkimukset ja yhteenveto vaahtolasimurskeen hyödyntämisestä

Jatkotutkimuksissa tulisi selvittää toimiiko vaahtolasimurske paremmin routaeristeenä, jos sen alapuolelle tehdään lisäksi suodatinkerros hiekasta. Kyseinen vaihtoehtoinen poikkileikkaustyyppi on esitetty kuvissa 6.5 ja 6.6 kantavuusluokille E ja F. Tutkimuskohteessa voitaisiin osa kadusta rakentaa vaahtolasimurskekerroksen ollessa suoraan pohjamaan päällä ja osa kadusta hiekkakerroksen ollessa vaahtolasimurskeen ja pohjamaan välissä. Seuranta koostuisi keväisin mitattavasta routanoususta ja siitä saatavien tuloksien vertailusta. Yhteenvetona vaahtolasimurskeen hyödyntämisestä maarakentamisessa voidaan todeta seuraavaa:

- Vaahtolasimurske on routaeristeenä hyvä, joten sillä voidaan vähentää routimisesta aiheutuvia ongelmia tehokkaasti.
- Routaongelmien vähentyessä kadun korjaustarve vähenee ja samalla myös käyttöikä pitenee.
- Vaahtolasimursketta voidaan käyttää monenlaisissa kevennysrakenteissa
- Kuljetuskustannuksissa saadaan säästöä, koska vaahtolasimursketta voidaan kuljettaa kerralla enemmän ja se painaa vähemmän kuin tavallinen kiviaines.
- Rakentaminen on hyvin lähellä samanlaista kuin tavanomaisilla kiviaineilla, isoimmat eroavaisuudet rakentamisen kannalta ovat materiaalien tiivistämistavoissa ja vaahtolasimurskekerroksen yliajamisen rajoittaminen liian isolta pintapaineelta
- Vaahtolasimurskeen käyttö suodatinhiekan korvaajan voi olla tulevaisuudessa hyödyllistä, koska luonnon hiekan saatavuuden heikentyessä hiekan käyttöä tulisi vähentää.

LÄHDELUETTELO

Cahyana Styrofoam, Indonesia [WWW]. [Viitattu 22.6.2013]. Saatavissa: <http://www.cahyana.com/cgeofoam.php>

Ehrola, E. 1996. Liikenneväylien rakennesuunnittelun perusteet. Helsinki, Rakennustieto Oy. 365 s.

EPS-rakennuseristeteollisuus. 2013. Mitä EPS on? [WWW]. [Viitattu 12.6.2013]. Saatavissa: <http://www.eps-eriste.fi/mita-eps-on>

Eriksson, L. & Hägglund, J. 2008. Handbok, Skumglas I mark-vägbynad. [WWW]. [Viitattu 19.6.2013]. Saatavissa: <http://www.swedgeo.se/upload/Publikationer/Info/pdf/SGI-I18-1.pdf>

Eskola, Juuso. Vuoreksen työmaan vaahtolasimurskekohteen rakentaja. Tampere. Haastattelu 2.8.2013

FORE. 2013. [WWW]. [Viitattu 6.7.2013]. Saatavissa: <http://www.fore.fi/etusivu>

Forsman, J., Sikiö, J., Ronkainen, M., Hakari, M. (2012). Foamit-vaahtolasi, Suunnittelu & rakennusohje.

Gull, M. 2011. Betonijätteen hyödyntäminen maarakentamisessa. Kuopio 2011. Savonia-ammattikorkeakoulu. [WWW]. [Viitattu 7.8.2013]. Saatavissa: https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/37513/Gull_Mikael.pdf?sequence=1

Humphrey, D. N. 2013. Tire Derived Aggregate – A New Road Building Material. [WWW]. [Viitattu 3.6.2013]. Saatavissa: http://www.vegvesen.no/_attachment/110538/binary/192707

InfraRYL 2006. (2006). Rakennustieto Oy, Helsinki. 624 s.

Ingo, Jan-Ove. Rakennuttajainsinööri, Vaasan kaupunki. Puhelinhaastattelu. 29.8.2013

Kanerva, H. 1985. TROXLER 3411-B:n soveltuvuus tierakenteen tiiviystarkkailuun. Tampere 1985. Tampereen teknillinen yliopisto. 65 s. + liitteet. 22 s.

KATU 90: kadunrakennuksen tekniset ohjeet. 1991. Suomen kunnallisuusteknillinen yhdistys. Helsinki. 273 s.

KATU 2002: kadunrakennuksen tekniset ohjeet. 2003. Suomen kuntatekniikan yhdistys. Helsinki. 281 s.

KH-kortisto, Kevytsora. 2013. Rakennustieto Oy.

Kielo, Mikko. Vanhempi erikoissuunnittelija, Tampereen kaupunki. Tampere. Haastattelu 18.9.2013

Köylijärvi, Emilia. Vaahtolasimurskeen käyttö maa- ja pohjarakentamisessa. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä. Julkaistaan 2014.

Liikennevirasto. 2011. Kevennysrakenteiden suunnittelu, Tien pohjarakenteiden suunnittelu. Liikenneviraston ohjeita 5/2011. [WWW]. [Viitattu 20.6.2013]. Saatavissa: http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lo_2011-05_kevennysrakenteiden_suunnittelu_web.pdf

Lindroos, N. 2013. Foamit®-vaahtolasi kulkeutumisriskin tarkasteluja pohjavesialueilla. [WWW]. [Viitattu 30.6.2013]. Saatavissa: <http://www.foamit.fi/DowebEasyCMS/Sivusto/Dokumentit/foamit/Vaahtolasin%20kulkeutumisriskinarvio%2025%203%202013.pdf>

Pekkala, Jarmo. Myyntijohtaja, Uusioaines Oy. Forssa. Haastattelu 5.6.2013

Pittsburgh Corning Corporation. 2013. Milestones in innovations. [WWW]. [Viitattu 5.8.2013]. Saatavissa: http://www.industry.foamglas.com/en/about_us/history/milestones_in_innovation/

Päällystealan neuvottelukunta PANK. 2002. [WWW]. [Viitattu 12.6.2013]. Saatavissa: http://www.pank.fi/file/414/281_pank9001.pdf

RIL 2013. RIL-Routasuojaus – rakennukset ja infrarakenteet. RIL 261-2013.

Roadmasters, Levykuormituskoe-sivu. [WWW]. [Viitattu 10.6.2013]. Saatavissa: <http://www.roadmasters.fi/images/levykuormitus1.jpg>

Ronkainen, Marjo. Projektipäällikkö, Ramboll Oy. Puhelinhaastattelu 4.7.2013

Saarelainen, S. VTT, Paksun EPS-kerroksen kuormituskestävyys. [WWW]. [Viitattu 3.7.2013]. Saatavissa: <http://www.eps-eriste.fi/component/phocadownload/category/7-raportit?download=304:epstress-loppuraportti-2003>

Siika, T. Katurakenteiden staattinen ja dynaaminen kantavuus. Helsinki 2006. EVTEK-ammattikorkeakoulu. [WWW]. [Viitattu 8.8.2013]. Saatavissa: <http://www.hel.fi/wps/wcm/connect/2e3818004a159b2c88e8ecb546fc4d01/Instyo.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=2e3818004a159b2c88e8ecb546fc4d01>

Stikloporas. 2013. History. [WWW]. [Viitattu 8.8.2013]. Saatavissa: <http://www.stikloporas.lt/eng/What-is-foamglass-granulate>

Suomen kuntaliitto. 2003. Kunnallisteknisten töiden yleinen työselostus 02. Helsinki. s.63.

Tampereen kaupunki. 2013. Vuoreskeskus. [WWW]. [Viitattu 3.9.2013]. Saatavissa: <http://www.tampere.fi/ytoteto/aka/nahtavillaolevat/8160/8160liite5.pdf>

Tekninen toimi, Tampereen kaupunki. 2003. Katusuunnitelmien ja rakennussuunnitelmien laatimissohje. Tampere. 127 s. + liitteet 31 s.

Tiehallinto. 2004. Tierakenteen suunnittelu. [WWW]. [Viitattu 25.6.2013]. Saatavissa: <http://alk.tiehallinto.fi/thohje/pdf/2100029-v-04tierakenteensuunn.pdf>

Tiehallinto. 2003. Kiviainesten vaatimustenmukaisuuden osittaismenettely, yleiset tied. [WWW]. [Viitattu 8.8.2013]. Saatavissa: http://alk.tiehallinto.fi/thohje/pdf/kiviaines_ac_tieh041203.pdf

Tompuri, V. 2013. Foamit-lehti. Hyvinkää, T-Print Ky. 11s.

Troxler labs, Yhdysvallat. [WWW]. [Viitattu 22.6.2013]. Saatavissa: <http://www.troxlerlabs.com/images/Products/3440.jpg>

LIITTEET

- LIITE 1: Kantavuusmittausten tulokset Vuoreksen rakennuskohteesta
- LIITE 2: Kangasalan kohteen katurakenteen ja seurantamittausten tiedot
- LIITE 3: Laskentapohja katurakenteen kantavuus- ja routamitoitukseen



TAMPEREEN KAUPUNKI
Suunnitteluyksikkö/Maastotutkimukset

Työkohte:

Tilaaja:

Paikka:

Rakennekerros:

Kokeen suorittaja:

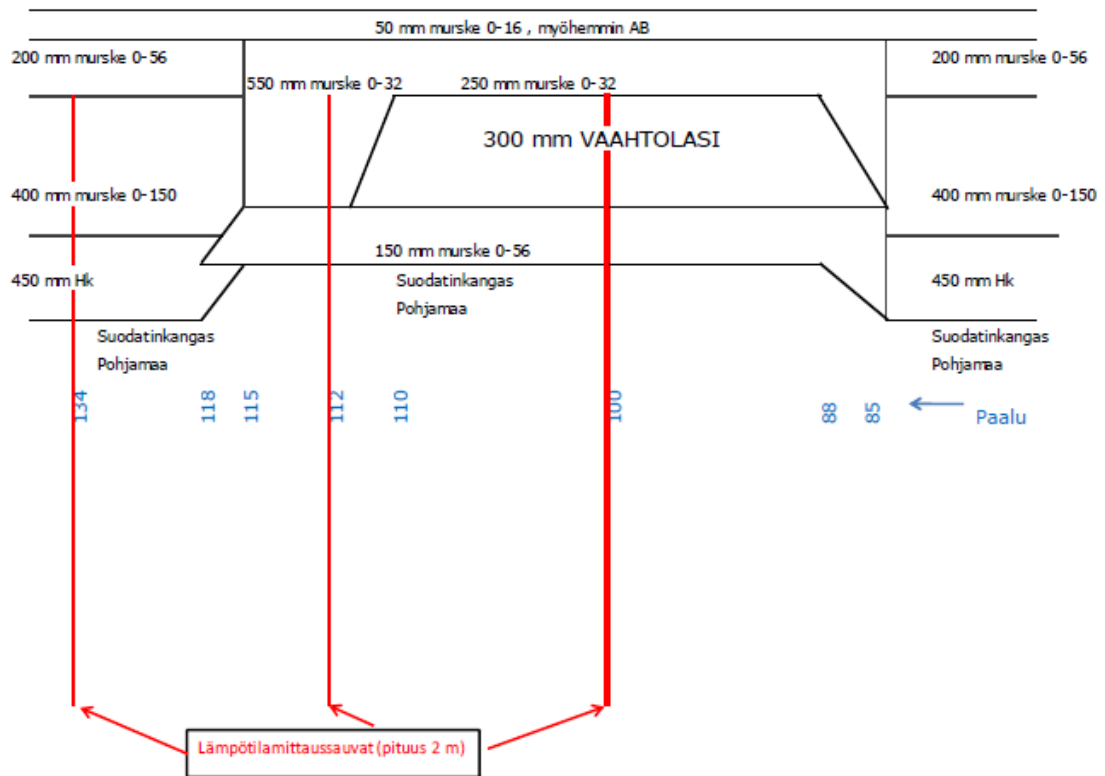
Pvm:
Lämpötila:

Sää:

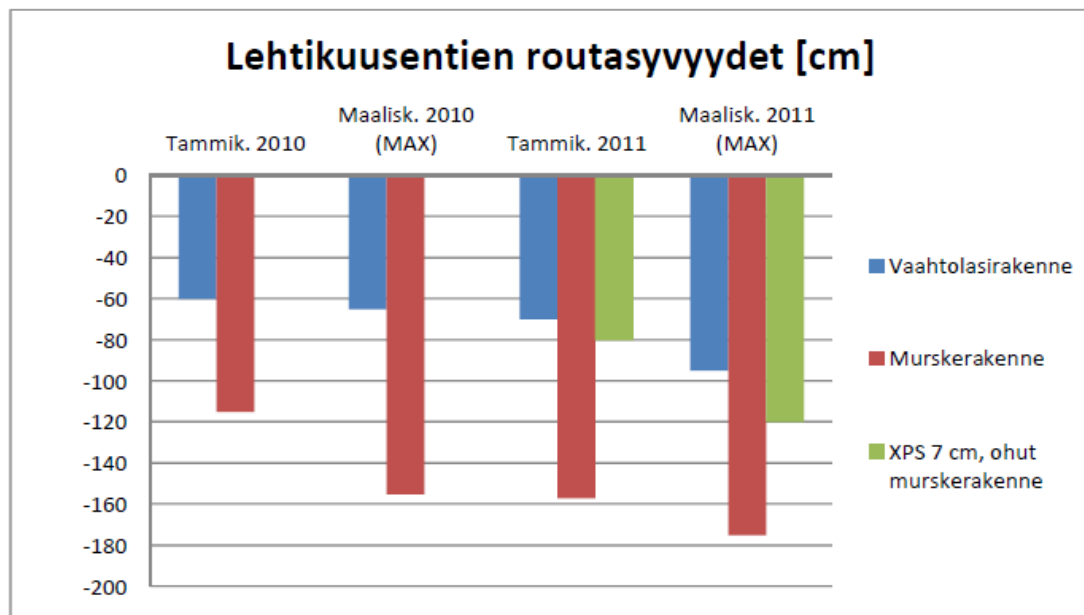
HUOM:

Mittaus												
Nro	PL	Vas/Oik	E1	E2	E2/E1	E3	E3/E1	E4	E4/E1	E5	E5/E1	E6
1			21	36	1,74	46	2,24	48	2,32			
2			18	31	1,73	35	1,94	38	2,11			
3			29	46	1,55	50	1,70	40	1,36			
4			17	38	2,24	44	2,55	45	2,62			
5			16	30	1,85	36	2,20	37	2,23			
6			15	30	1,97	35	2,28	37	2,43			
7			16	37	2,28	43	2,70	47	2,91			
8			16	33	2,08	31	1,97	38	2,40			
9			14	30	2,16	36	2,58	39	2,77			
10			16	31	1,95	29	1,81	36	2,28			
11			20	31	1,52	36	1,77	39	1,92			
12			14	29	2,08	34	2,37	35	2,40			
13			18	35	1,91	42	2,28	43	2,32			
14			19	36	1,91	41	2,18	39	2,02			
15			15	35	2,26	40	2,62	42	2,74			
16												
17												
18												
19												
20	ANTOKAN	1/3	139	1,24	143	1,27	151	1,35				

TÄLLÄ



Kuva 7. Periaatekuva rakenteiden, siirtymärakenteiden ja instrumentoinnin sijainnista Lehtikuusentien vaahtolasikoerakentamiskohteella.



Kuva 15. Yhteenvetokuvaaja routarajan syvyydestä Lehtikuusentiellä talvina 2009-2010 ja 2010-2011.

Katurakenteen laskentapohja kantavuudelle ja routanousulle

Katuluokka: **5**
Tavoitekantavuus: **200** MPa
Sallittu routanousu: **70,0** mm

h m		Materiaali	materiaalikerroin	E MPa	E _{max} MPa	E _A MPa	E _Y MPa
0,05	Päällyste	AB 20/125	1	2500	975	203	202
0,15	Kantava	KaM 0-56	0,9	280	740	123	163
0,4	Jakava	KaM 0-56	0,9	280	205	34	123
0,2	Suodatin	Suodatinhiekkä	1	70	120	20	34
0	Pohjamaa	Savi		1	420	20	70

Kantavuus päällysteen
päältä:

202 Mpa

OK!

Huom:
Mikäli kerroksen paksuus on yli 0,3m, tulee se jakaa osiin niin, että 0,3 m kerrospaksuutta ei ylitetä.

Routalaskenta:

Siirtymäkiila, S **1,6** m
kerroin, t **0,16**

Routanousu 104,8 mm

Ei kelpaa